

对土壤侵蚀研究的几点思考

张光辉^{1,2}

(1.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875;2.北京师范大学地理科学学部,北京 100875)

摘要: 土壤侵蚀是现代地理环境条件下改变地貌景观的主要过程,也是引起土壤质量退化、沙漠化与石漠化的核心因素,与土壤、生态、水文等多个地表过程密切相关。虽然土壤侵蚀研究需要气候、地质、地貌、土壤、水文、生态等相关学科的基本知识,分析土壤侵蚀发生、发展过程的动力机制,但需要明确界定土壤侵蚀研究的时空尺度。土壤侵蚀与水土保持之间相互联系、相互促进。土壤侵蚀研究的时间尺度以次降雨、月、年为主,研究主题为次降雨侵蚀过程、土壤侵蚀季节变化与年际变化,时间尺度不宜超过100年。土壤侵蚀研究的空间尺度以小流域为主,基于土壤侵蚀垂直分带性,可以进一步分为样点、坡面、沟坡与小流域。在不同空间尺度上,研究内容与研究方法差异明显。土壤侵蚀过程包括土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积,各个过程的主控因素存在差异,研究成果积累差异明显,研究重点会随着时空尺度的变化而有所不同。在土壤侵蚀过程研究中,应充分理解分离控制和输移控制及其时空转换阈值。虽然土壤侵蚀研究已经取得了大量成果,但在细沟网络结构及其时空变化、泥沙沉积过程、沟蚀形成与演变动力机制、重力侵蚀发育过程动力学机理、小流域土壤侵蚀过程模型等诸多方面,亟待加强研究。

关键词: 土壤侵蚀;水土保持;时空尺度;侵蚀过程;研究领域

中图分类号: S15

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0021-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.004

Several Ideas Related to Soil Erosion Research

ZHANG Guanghui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earth Surface Processes and Ecological Resources, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Soil erosion is a key process to alter landforms under modern geo-environmental conditions. It is also the main element to soil degradation, desertification and rocky desertification and is closely related to earth surface processes of soil, ecology and hydrology. The knowledge of climatology, geology, geomorphology, pedology, hydrology, and ecology are needed to analyze the dynamic mechanisms of soil erosion occurring and development. However, the boundaries of temporal and spatial scales need to be identified clearly. Soil erosion is closely related to soil and water conservation and they are stimulated to each other. The temporal scale of soil erosion research focuses on rainfall event, month, and year. The main topics are erosion processes of rainfall event, seasonal and inter-annual variations in soil erosion. The time scale should be less than 100 years. The spatial scale of soil erosion research should be focus on small watershed. Based on the vertical distribution of soil erosion in small watershed, site, hillslope, gully and small watershed are commonly selected to study soil erosion. Nevertheless, the contents and methods are quite different from different scales. Soil erosion includes three sub-processes of soil detachment, sediment transport and sediment deposition. The key influencing factors and the research accumulations of these sub-processes are significantly different. The studying topics change with the temporal and spatial scales. The detach-limited and transport-limited as well as their altering threshold conditions should be always remind in mind to understand your experimental results. The future studies should be enhanced on rill network and its temporal-spatial variations, sediment deposition, dynamic mechanism of gully formation and evolution, mechanism of gravity erosion development, process-based soil erosion model for small watershed.

Keywords: soil erosion; soil and water conservation; spatial and temporal scales; soil erosion processes; research fields

收稿日期:2020-01-02

资助项目:国家“十三五”重大研发计划项目“黄土丘陵沟壑区坡体一植被系统稳定性及生态灾害阻控技术”(2017YFC0504702);国家自然科学基金项目“退耕驱动近地表特性变化对侵蚀过程的影响及其动力机制”(41530858)

第一作者:张光辉(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:ghzhang@bnu.edu.cn

土壤侵蚀是现代地理环境条件下改变地貌景观的主要过程,也是引起土壤质量退化、沙漠化与石漠化的核心因素,与大气环境质量、生态系统稳定性、生物多样性、土地资源可持续利用、流域防洪、水体环境及水资源管理等密切相关。加强土壤侵蚀发生、发展动力机制与过程的深入系统研究,是制定合理的水土保持措施、阻控土壤退化、维持土地生产力、提高河道泄洪能力、延长水利工程使用寿命、改善水体质量、提升生态系统服务功能的前提和基础。

过去 100 年以来,国内外学者在土壤侵蚀类型与空间分布、影响因素与机理、土壤侵蚀过程及其水动力机理、土壤侵蚀时空分异规律、区域侵蚀产沙、土壤侵蚀预报模型、土壤侵蚀环境效应等诸多领域^[1-6],开展了大量卓有成效的研究工作,为土壤侵蚀学的发展和完善、研究方法与技术体系的进步、流域水土保持措施优化配置、区域生态环境保护奠定了坚实的基础。然而,深度分析土壤侵蚀研究现状,深感在土壤侵蚀学科定位、土壤侵蚀研究时空尺度、土壤侵蚀过程等方面,尚存在着许多疑惑与歧义,严重制约了对相关研究成果的理解,阻碍了土壤侵蚀研究的快速发展。因此,本文在系统分析土壤侵蚀与其他学科相关关系、土壤侵蚀研究时空尺度和土壤侵蚀过程的基础上,提出了未来土壤侵蚀研究亟待加强的内容,旨在规范土壤侵蚀研究思路,促进土壤侵蚀学科发展,更好地为水土保持规划、设计与措施配置服务,实现区域生态环境保护与高质量发展的宏伟战略目标。

1 土壤侵蚀与其他学科的关系

土壤侵蚀是气候、地质、地形、土壤、植被、土地利用等多种自然与人为因素综合作用的结果,因此,在研究土壤侵蚀过程中,势必会需要很多其他学科的知识,诸如气象与气候学、地质地貌学、土壤学、水文学、水力学、生态学、泥沙运动力学、物理学、数学、地理信息系统与地图学及计算方法等。气象与气候学中的天气现象,特别是降水是驱动水力侵蚀的原动力,降水强度、降水历时、降水面积、暴雨中心及其移动方向,都显著影响土壤侵蚀强度及其时空分布。温度的日变化与季节变化,决定了冻融侵蚀径流泥沙的日变化与季节分布、土壤蒸发与植物蒸腾强度以及土壤水分季节变化,而土壤水分的大小又直接影响降水入渗、坡面产流与产沙过程。土壤侵蚀发生在土壤界面,土壤类型、质地、结构、容重、黏结力、团聚体数量及其稳定性、有机质含量、钠离子浓度等直接决定了土壤孔隙的大小、多少和连通性,控制降水入渗及侵蚀过程,决定了土壤侵蚀动力的大小和土壤抗蚀性能的强弱,从物理本质上讲,土壤侵蚀就是侵蚀动力与

土壤抗蚀性能相互作用的结果^[7-8]。土壤理化性质时空变异,直接影响土壤侵蚀时空分布特征。水文学是研究地球上水的分布、运动、循环及其与人类社会活动相互关系的学科,其产流过程与汇流过程和土壤侵蚀直接相关,对产流机制的深入分析,有助于量化地表径流、壤中流和地下径流的大小。地表径流是土壤分离的驱动力,也是泥沙输移的载体,其大小及其时空分布,直接影响土壤侵蚀强度与时空分异特征。壤中流发育及其在流域下部的出露,会促进土壤侵蚀,特别是沟蚀发育^[9],同时与非点源污染物的迁移过程密切相关。在满足植被截留、地表填洼和土壤入渗的同时,坡面必然会产生地表径流,向下坡流动,这一过程会不可避免地涉及到水力学。坡面径流属于典型的薄层水流,其属性沿程多变,流态受降雨特性、径流量大小、地形条件、地表随机糙率、植被生长、砾石覆盖与出露、侵蚀形态与演变过程、含沙量等多种因素影响^[10-11]。在野外条件下,流量和坡度是最易测定的水动力学参数,因而被广泛用于土壤侵蚀过程模拟^[12]。流速是流量、坡度、下垫面条件综合作用的结果,与土壤侵蚀过程密切相关,因而,研究不同条件下坡面径流流速,并构建流速与土壤侵蚀过程间的定量关系^[13-14],是土壤侵蚀研究的重要领域。探索坡面径流阻力特征,是揭示土壤侵蚀时空变化物理本质的基础,因而坡面径流阻力特征也是土壤侵蚀研究的重要内容,受到广泛关注^[15]。在构建土壤侵蚀过程模型时,全球多采用水流剪切力、水流功率和单位水流功率等综合性水动力学参数,而表征能量的水流功率可能是模拟土壤侵蚀过程最佳的综合性水动力学参数^[16-17]。植被具有强大的水土保持功能,显著影响土壤侵蚀过程,无论是植被冠层截留作用、枯枝落叶的蓄水功能、枯落物分解以及根系生长与死亡,都会促进降水入渗,减少地表径流,降低土壤侵蚀动力,而冠层与枯落物保护地表、生物结皮的生长发育、根系的加筋与锚固效应,都会显著提升土壤抗蚀性能^[18-20]。生态建设工程是促进区域植被恢复的有效途径,而随着植被的逐渐恢复或演替,植物群落物种组成、生物多样性、丰富度等生态学属性就会发生巨大变化^[21],导致植被提升土壤抗蚀性能的作用随着植物群落类型、退耕年限、退耕模式的变化而出现显著差异,且具有明显的季节变化特征^[22-23]。

开展土壤侵蚀研究,除了必须系统了解、熟悉、掌握土壤侵蚀相关的理论知识体系、研究方法和研究设施以外,势必需要上述如气象气候学、地质地貌学等相关学科理论知识的支撑与帮助,但研究的思路、理念、角度、范围、方法和时空尺度,必须要和土壤侵蚀研究需求相辅相成,土壤侵蚀研究不是研究气象气候

学、地质地貌学、土壤学、水文学、水力学、生态学和泥沙运动力学本身,而是为分析、解释、揭示土壤侵蚀动力过程、时空分异特征提供理论支持。土壤侵蚀研究空间尺度的重点应该是小流域(图 1),在面积 $<50\text{ km}^2$ 的小流域内,土壤侵蚀研究涉及的侵蚀类型、影响因素、侵蚀过程、垂直分带性、时空分布、水沙关系、环境效应、水土保持措施配置、水土保持效益分析、生态功能服务等内容,都可开展深入系统的研究。当研究尺度从小流域扩大到流域(数千平方公里)时,研究的重点内容、核心过程、控制因素都会发生变化,相应的研究方法和思路以及对应的学科也会发生变化(图 1)。以侵蚀泥沙为例,在小流域尺度上,土壤侵蚀研究可以辨识侵蚀泥沙来源、分析泥沙的多少及其时间变化等,但当侵蚀泥沙被输移到河流以后,泥沙运动则受控于径流量大小、河道断面形态、河流比降以及水利工程(如水库)的规模与空间分布等,解决问题则是河流泥沙运动力学研究者的专长。随着研究尺度的进一步扩大,到区域(大江大河、省域等)尺度,关注的重点则转变为空间分异或地带性问题,而研究地带性则是地理学的重点内容(图 1)。随着科学技术的快速进步,任何学科的发展都不可能离开相关学科的支持,多学科交叉与融合是历史发展的必然,但土壤侵蚀研究者需要时刻清楚,需要学习、借鉴的是相关学科研究的思路、理念和方法,取长补短。为了分析、揭示土壤侵蚀过程与机理,只有通过不断地借鉴和学习,才能促进土壤侵蚀学科的发展和土壤侵蚀研究的快速进步,更好地服务于水土保持生产,阻控水土流失,维系区域生态平衡与社会经济的可持续发展。

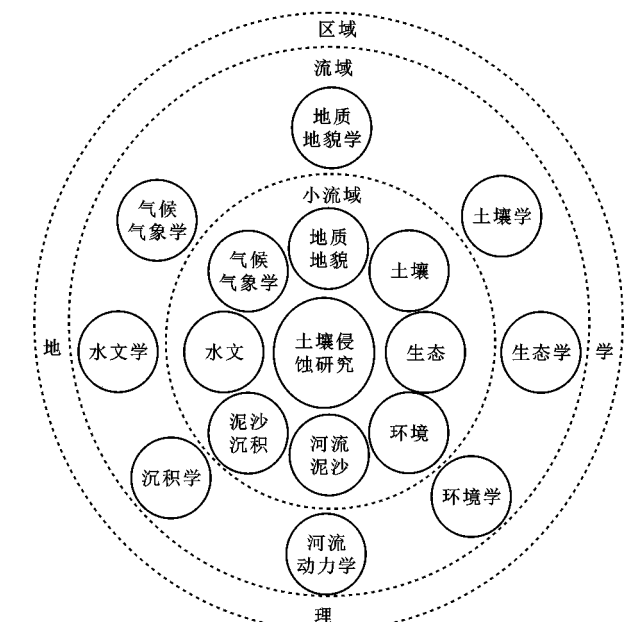


图 1 土壤侵蚀与其他学科的关系

土壤侵蚀与水土保持密切相关,明确土壤侵蚀与水土保持的逻辑关系,对土壤侵蚀研究至关重要。要

明晰土壤侵蚀与水土保持的关系,首先需要明确科学、技术与工程的辩证关系,用通俗语言表达,科学是对未知世界的探索和认知,技术是在系统总结、凝练科学研究结果基础上形成的方法、标准、法规和法律体系,工程则是为了实现某一目的而采取的社会实践活动。科学是技术的基础,技术指导工程,工程实施提出技术需求,促进技术进步,工程实施可能出现新的问题,需要科学继续探索,当前的技术无法满足工程需求,则需要继续加强科学研究,科学—技术—工程相互影响、相互促进、共同进步,但在一定的历史时期或对于特定的社会群体,科技、技术和工程的进步可能并不同步。从本质上讲,土壤侵蚀涉及的内容,都属于科学研究范畴,而水土保持则既包括科学研究内容,也包括技术凝练和工程实践内容。水土保持措施适宜性、水土保持措施发挥效益的作用机理、水土保持效益随坡度变化并趋向失效的坡度阈值等内容,属于科学研究;水土保持规划设计、水土保持监测、水土保持措施体系、水土保持相关的标准、法规等,属于技术范畴;而各种大规模的水土保持生产,如坡改梯、生态建设工程、淤地坝建设等属于工程范畴。不同性质的工作或任务,应该有不同性质的单位来完成,水土保持中科学研究部分,应该由高等院校、国家级科研院所来完成,水土保持技术体系应由行业研究院所和省级研究所来完成,而水土保持工程的实施,则由水利部、流域机构、省、市、县级水务(水保)部门来完成。土壤侵蚀研究为水土保持研究与技术总结提供理论基础,水土保持技术进步会更好地指导水土保持工程,水土保持工程的大面积实施,产生新的问题和技术需求,则会促进土壤侵蚀研究和水土保持技术革新。如大面积实施的“退耕还林(草)”工程,导致区域侵蚀环境发生了重大变化,植物群落近地表特性的显著变化,势必会引起土壤侵蚀动力和土壤抗蚀性能的双重变化,为了揭示这些变化对土壤侵蚀过程的潜在影响与机理,则需要新的环境条件下,开展大量土壤侵蚀研究工作,提升与完善对土壤侵蚀动力过程的认知^[24]。

2 土壤侵蚀研究的时空尺度

土壤侵蚀研究的时空尺度,在很大程度上决定着土壤侵蚀研究的范围,因而明确土壤侵蚀研究的时空尺度问题,对于梳理土壤侵蚀研究思路、促进土壤侵蚀学科建设具有重要意义。土壤侵蚀研究的时间尺度,变化范围很大(表 1),不同时间尺度上的研究重点各有差异,分别论述。次降水是最常见的研究时间尺度,以次降雨为对象,系统研究降水、地形、植被、土壤、土地利用等因素对径流小区、全坡面或小流域产流产沙过程的影响。与土壤侵蚀密切相

关的许多地表过程,其变化都发生在次降雨过程,如降水截留、土壤入渗、地表填洼、地表随机糙率、水文功能连通性、土壤水分运动与再分布、污染物迁移、细沟形成与发育等。为了有效模拟产流和侵蚀过程,降低降雨强度随时间变化引起的模拟难度,通常将时间进行分布,以秒或分钟为时间步长,在很短的时间段内,可以假定降水随时间没有变化,用时段平均降雨强度替代瞬时降雨强度,则将微分问题转化为差分问题,模型求解更为简单高效。在日尺度上,很多影响土壤侵蚀的要素都会发生变化,特别是与温度密切相关的冻融侵蚀,温度的日变化导致土壤处于冻结—融化—冻结的周期变化,对应的径流和侵蚀产沙过程也具有明显的日变化。在西北内陆的干旱和半干旱地区,高山积雪与冰川融化是流域径流补给的主体,温度日变化直接影响河川径流与泥沙,对应的研究思路必须加以调整。植被生长受控于温度积累过程,其根系分解也与土壤水分和温度密切相关,因此,作物生长模型多以日为时间步长,实现作物生长过程模拟。在季风气候区,降水集中,对于以降水为侵蚀动力的土壤水蚀研究,则需要关注整个雨季植被生长的变化过程,包括其高度、盖度、生物量、枯落物蓄积量及根系密度的季节变化。对于侵蚀产沙的策源地——坡耕地而言,在月尺度上,农事活动(耕作、播种、锄草、施肥、收获等)会发生明显的变化,不同农事活动对地表的扰动程度差异明显,导致土壤侵蚀强度发生明显变化^[25]。气候具有明显的随机性,在年际尺度上,降水的多少可能存在显著差异,因而在年尺度上,需要分析、比较降水等气候特征年际变化对土壤侵蚀过程的影响。同时在很多区域,都存在着比较固定的农作制度,在黄土高原许多地区以一年一熟或两年三熟为主,多以大豆—小麦—玉米—谷子—马铃薯—大豆的农作制度进行循环,因而对坡耕地土壤侵蚀的研究,也应该遵循同样的农作制度,完成整个轮作制度内的相关研究,获得比较可靠的研究结果。对于短期、中期和长期的定义是个相对概念,没有明确的规定,但土壤侵蚀研究的短期应在 20 年以内,中期为 50 年以内,而长期则小于 100 年。在短期时间尺度上,土壤侵蚀研究更多地聚焦于水土流失、生态建设工程等过程导致的土壤性质变化及其对土壤侵蚀的潜在影响。

表 1 土壤侵蚀研究的时间尺度及重点研究内容

时间尺度	时分秒	日	月	年	短期	中期	长期
重点研究内容	次降雨侵蚀过程与下垫面变化	温度日变化、植被生长特性、土壤水分	降水季节分布、植被生长特性、农事活动	气候年际波动、农作制度	土壤性质变化、土壤可蚀性、切沟演变过程	土地利用变化、植被覆盖变化、区域水沙变化	气候变化的侵蚀环境效应

与时间尺度类似,土壤侵蚀研究也具有明显的空间尺度(表 2)。在样点(或样方)尺度上,需重点研究气候、微地形、土壤性质、土壤水文与水力特性、植被

土壤可蚀性是表征土壤抵抗侵蚀的潜在能力,与土壤性质密切相关,但受降水等气候特征年际变化的影响,对土壤可蚀性的研究,至少应该在短期时间尺度上进行。切沟作为流域侵蚀的重要类型,是连接坡面与沟道的枢纽,也是流域侵蚀产沙的主要来源,对其形成与发育过程的研究具有重要意义。但与细沟或浅沟侵蚀不同,切沟的演变过程需要更长时间,最少在短期时间尺度上,研究切沟的演变过程,才能比较完整地认识切沟形成、发育的整个过程,进而对切沟发育的动力机制有更深入的理解,为其治理提供理论基础。虽然土地利用方式与结构的调整具有一定的随机性,如某项政策的实施、矿产资源的发现与开发等,但社会经济和科技进步导致的土地利用结构调整,是个相对缓慢的过程,需要在中期时间尺度上进行研究。土地利用类型与结构的变化,势必会引起土壤侵蚀发生响应^[26],而土地利用结构的调整又会引起植被覆盖的相应变化,进一步引起区域土壤侵蚀过程发生转变,无论是土地利用结构的调整,还是与其对应的植被覆盖的改变,都会引起区域生态水文与侵蚀过程发生变化,而研究区域尺度水沙变化规律及其归因分析,则是中期时间尺度上土壤侵蚀研究的重点。在长期时间尺度上,气候变化可能是引起土壤侵蚀变化的主要驱动力,在全球气候变化影响下,在可预见的未来,全球升温是必然结果,则与温度直接相关的生态、水文、侵蚀过程的相关研究,必须在全球气候变化的大背景下进行,特别是全球气候变化对冻融侵蚀的潜在影响、风力侵蚀对温度上升导致植被覆盖变化的响应与机制、西北内陆地区高山积雪与冰川消融及其侵蚀效应与全球气候变化的关系、高海拔地区(如青藏高原)生态、水文、侵蚀过程对全球气候变化的响应与机理等方面,需要特别关注。土壤侵蚀研究的核心目的是为水土保持技术体系的凝练、集成提供理论基础,为流域水土流失综合治理提供理论支持,因此,没必要过于强调正常侵蚀、地质侵蚀和加速侵蚀等概念的区别与联系,因为当研究的时间尺度超过长期以后,很多过程已经不属于土壤侵蚀的研究重点,如在短期尺度上,可利用水库或湖泊泥沙动态变化,反演流域侵蚀泥沙的多寡及其来源,但超过一定时间尺度后,则变成了泥沙沉积学或环境演变学,而不再是土壤侵蚀的研究重点。

生长特征、地表填洼、侵蚀类型与强度等内容。样点尺度的研究结果,为理解更大空间尺度,特别是坡面尺度研究成果奠定理论基础,经常作为影响坡面侵蚀

的因素,综合分析坡面侵蚀时空分布的差异,揭示坡面侵蚀过程的动力机制。样方的大小,可以非常小,也可以在几十甚至 100 m² 左右,如降雨量的监测仅代表了雨量筒安装位置的降雨特性,而植被生长特性调查样方的大小,一般随着植被类型的变化而有所差异,如乔木多采用 10 m×10 m 的样方,灌木多采用 5 m×5 m 的样方,而草本多采用 1 m×1 m 的样方进行调查。研究结果与样方的位置选择及其重复数量密切相关,因而在样方选择时必须综合考虑、充分代表研究区的基本情况,才能进一步分析相关属性对土壤侵蚀的影响。坡面是小流域重要的地貌单元,也是土壤侵蚀研究的重点所在。无论是土壤侵蚀规律与影响因素、土壤可蚀性、细沟发育与演变过程、浅沟形成机制、水土保持措施效益,还是长坡面侵蚀泥沙来源,都是坡面尺度研究的重要内容(表 2)。径流小区是开展坡面土壤侵蚀研究的基本设施,通过控制试验的思路,在保持其他影响因素不变的情况下,改变其中一个因素即可量化该因素对土壤侵蚀的影响^[27]。标准小区是研究土壤可蚀性的有效途径,它是水平长度为 20 m、宽度为 5 m、坡度为 5°或 15°、小区内连续休闲清耕、植被盖度<5%的径流小区,是分析径流小区监测数据的基础平台。标准小区不但要在规格上满足条件,而且小区内的处理也必须符合标准小区的基本要求。笔者在审稿过程中或阅读文献时,经常看到有人误解标准小区,认为满足标准小区的规格要求即为标准小区,这里再次强调,标准小区必须同时满足其规格和小区内处理两方面的要求。根据研究需求,可以建设多种不同规格及处理的径流小区,利用收集的径流泥沙资料,分析坡面土壤侵蚀过程与机理。为了研究细沟网络结构,径流小区的长度必须足够长。要监测切沟发育过程,则径流小区的面积要足够大、长度要足够长,因此,径流小区的建设,必须与其目的密切相关,同时要加强对径流小区的日常维护与管理。小流域是土壤侵蚀研究的主体,也是水土保持综合治理的基本单元。小流域侵蚀泥沙来源、沟蚀与重力侵蚀泥沙贡献率及土地利用变化对土壤侵蚀的影响、水土保持措施优化配置及水土保持综合治理,

都属于小流域的研究重点。利用同位素示踪的基本思路、采用复合指纹示踪技术即可诊断小流域侵蚀泥沙来源^[28]。在小流域尺度上,土壤侵蚀具有典型的垂直分带性,特别是在黄土高原丘陵沟壑区更是如此(图 2),其根本原因是坡度变化和径流沿程的不断积累。小流域土壤侵蚀垂直分带性的存在,使得土壤侵蚀研究的重点随着空间尺度的变化而发生变化,从坡面到沟道、再到小流域,水力侵蚀的影响逐渐降低,沟蚀和重力侵蚀的影响逐渐加强,而不同侵蚀类型的影响因素与驱动机制各不相同,对应的研究思路与方法都要适当调整。流域是个地貌学概念,是指某一过水断面以上由分水岭组成的积水区域。但在这里是和小流域相比、面积较大的一个相对概念,虽然没有严格的面积规定,但最少在县域以上、包含至少 1 个水文站。在流域尺度上重点研究小流域特性(如其形状、比降等)对土壤侵蚀的影响,同时受气候、地形和植被空间分异特征影响,土壤侵蚀时空分异特征比较明显,也是流域尺度研究的重点内容之一。到了流域尺度,研究的重点已经转移到河川径流与泥沙的大小,更多关心以泥沙输移比为核心的泥沙输移问题。由于水利工程、特别是大型水库建设对流域泥沙输移过程的影响较为显著,因而分析水利工程对流域水沙关系的影响,也是流域尺度土壤侵蚀研究的重点内容。区域是一个相对模糊的概念,与流域相比面积更大,可以是面积很大的流域,也可以是某个级别的行政区,但最少应该包括若干个水文站、面积在省域以上。利用水文站径流泥沙长期的监测数据,可以分析区域侵蚀环境演变的水沙效应,并通过双累积曲线等数学方法,分析气候变化与人类社会活动的相对贡献。通过区域水沙变化分析,也可以利用水文法确定区域水土保持效益。在区域尺度,也可以分析伴随水沙输移的碳迁移与转化过程及其环境效应。通过区域水沙数据的长期监测,即可获得区域水土流失整体情况,从而提出区域水土保持战略。需要强调的是,样点—坡面—小流域是土壤侵蚀研究的重点所在,流域和区域尺度的土壤侵蚀研究,其关注度应该明显小于样点、坡面和小流域。

表 2 土壤侵蚀研究的空间尺度及重点研究内容

空间尺度	样点	坡面	小流域	流域	区域
重点研究内容	气候、微地形、土壤、植被、水力、水文、侵蚀等要素与过程的时空变化	土壤侵蚀规律与影响机制、土壤可蚀性、水土保持措施效益、沟蚀发育过程、长坡侵蚀泥沙来源	侵蚀泥沙来源、沟蚀及重力侵蚀、土地利用变化的水土保持效应、水土保持措施配置、水土保持综合治理	小流域特性对土壤侵蚀影响、土壤侵蚀时空分异特征、泥沙输移比、水利工程潜在影响	环境演变侵蚀效应、区域水土保持效益、土壤侵蚀环境效应、自然与人为影响诊断、水土保持战略

3 土壤侵蚀过程

土壤侵蚀是在外营力作用下发生的土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积过程^[29]。从过程而言,土壤侵蚀

包括土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积 3 个子过程。土壤分离是指在降雨击溅和径流冲刷作用下,土壤颗粒离开土体、转变为泥沙的过程;泥沙输移是指松散的

泥沙被径流从上坡向下坡、从上游向下游输移的过程;而泥沙沉积是指随径流运动的泥沙,在重力作用下沉降至土壤表面或河床上、变成静止泥沙的过程。无论是泥沙输移过程,还是泥沙沉积过程,其主体都是泥沙,而不是土壤。与泥沙相比,土壤具有稳定的结构,土壤颗粒间通过物理、化学及生物胶结作用,形成了相对稳定、具有一定黏结力的土壤结构,要把土壤颗粒从土体上分离出来,必须消耗一定的能量。而泥沙颗粒间是没有黏结力的,无论是原始土壤颗粒,还是具有一定结构的团聚体,它们都呈无黏结力的颗粒状态,这是泥沙与土壤的根本区别,在研究土壤侵蚀过程时,应时刻铭记在心。土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积之间相互影响、相互制约,土壤分离过程为泥沙输移过程准备了松散的泥沙,而泥沙输移过程又是个能量消耗过程,随着输沙率增大,径流能量降低,则用于分离土壤的能量相应下降,土壤分离速率降低^[30]。泥沙输移过程的核心是挟沙力,当径流输沙率小于挟沙力时,说明径流还有多余的能量,则径流继续分离土壤,使得径流输沙率持续增大,逐渐达到挟沙力,当下垫面相对稳定时,径流处于临时的既不分离、又不沉积的动态平衡状态。当下垫面坡度降低或下垫面随机糙率增大、阻力增大时,坡面径流挟沙力下降,则径流的实际输沙率大于挟沙力,部分多余的泥沙必须沉积,则泥沙沉积过程开始。泥沙沉积可能会改变下垫面状态,可能会出现“增阻”现象,也可能出现“减阻”现象,前者是泥沙沉积导致下垫面“粗糙化”,而后者是泥沙沉积引起下垫面“光滑化”的结果^[10]。沉积的泥沙也会覆盖地表、避免坡面径流直接分离土壤。

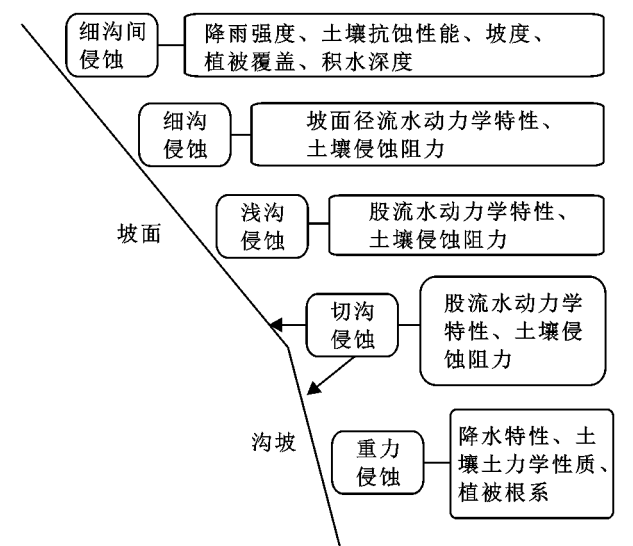


图 2 黄土高原丘陵沟壑区小流域土壤侵蚀垂直分带性及其主控因素

土壤分离过程的驱动力包括雨滴击溅和径流冲刷,前者与降雨强度、坡度、土壤性质、植被覆盖以及

地表积水深度密切相关,国内外的相关研究^[16]非常丰富,积累了大量研究成果,并构建了比较理想的预报模型。而由径流冲刷引起的土壤分离过程,主要受控于坡面径流水动力学特性和土壤侵蚀阻力(细沟可蚀性和土壤临界剪切力)。细沟可蚀性和土壤临界剪切力表征了土壤对径流冲刷的抵抗作用,与土壤性质(如类型、质地、容重、团聚体数量及其稳定性、有机质含量等)密切相关。植被生长发育导致的植被根系密度增大、枯落物与表土混合^[18,31],都会引起土壤细沟可蚀性和土壤临界剪切力发生变化。从物理本质上讲,细沟可蚀性与土壤临界剪切力随土壤性质的变化趋势应该是相反的,如当土壤质地从黏变砂,则细沟可蚀性增大,而土壤临界剪切力下降,反之亦然,但实际上有时并不会出现这种理想状态。总体而言,细沟可蚀性反映土壤侵蚀阻力的功能更强,与土壤性质的关系更为紧密,而土壤临界剪切力的变化则比较偶然,这可能与土壤临界剪切力主要受表层土壤性质影响,而表层土壤性质又具有强烈的时空变异有关。土壤分离能力是输沙率为 0 时径流分离土壤的最大值,它表征了一定水动力学特性条件下坡面径流分离土壤的潜力,虽然土壤分离速率与土壤分离能力的单位相同,但所表达的物理含义并不相同,一般讲土壤分离速率时,是指输移一定泥沙的径流所对应的分离速率,所以在使用过程中不能将土壤分离能力与土壤分离速率等同或互换。土壤分离能力必须在足够长的变坡试验水槽内,使用小样环采集的原状土测定,只有在变坡试验水槽内,才可以获得相对稳定的、不同的侵蚀动力(水流剪切力),从而得到不同水流剪切力条件下的土壤分离能力。利用实测的土壤分离能力,进一步拟合土壤分离能力(因变量)与水流剪切力(自变量)间的线性关系,则拟合直线的斜率为细沟可蚀性,而拟合直线在 X 轴上的截距则为土壤临界剪切力。为了获得比较稳定的细沟可蚀性和土壤临界剪切力,测定土壤分离能力的水流剪切力最少需要 5 个以上的不同等级,可以通过流量和坡度的不同组合获得。在实际测定土壤分离能力时,存在着许多不确定性^[32],试验时应该严格控制试验条件,尽量获得比较可靠的土壤分离能力,进而得到可靠的土壤侵蚀阻力。值得注意的是,土壤分离能力不是土壤分离过程研究的终极目标,而利用实测土壤分离能力分析土壤侵蚀阻力时空变化及其动力机制、进一步构建土壤侵蚀阻力预报模型或修订方程,才是土壤分离过程研究的最终目的。

泥沙输移过程的核心是坡面径流挟沙力,它是坡面径流水动力学特性和泥沙特性的函数^[33-34]。受降雨特性、地形条件、植被覆盖、土壤物理结皮发育、细

沟形成与发育等诸多因素的综合影响,坡面径流挟沙力具有强烈的时空变异特征,因而在野外条件下很难测定,利用静床变坡水槽、采用人工加沙方法是测定坡面径流挟沙力的有效途径^[35]。在野外条件下,只要确定了不同条件下的坡面径流水动力学特性、下垫面条件及泥沙特性,即可根据室内构建的挟沙力方程估算坡面径流挟沙力。需要注意的是,当径流和泥沙到达小流域的沟道时,尤其是流域或区域尺度的河流时,不能继续使用坡面径流挟沙力方程计算挟沙力,需要改用河流动力学中相应的泥沙挟沙力方程,同时需要根据泥沙是推移质还是悬移质选择合理的方程进行模拟。最核心的泥沙特性是粒径和比重,对于原始的土壤颗粒——黏粒、粉粒和砂粒而言,其比重都接近2.65,用2.65近似并不会对挟沙力估算产生较大影响,但侵蚀泥沙中的团聚体,其数量、稳定性、大小及其比重,都会随着降水特性、土壤质地、土地利用和农事活动强度与频度的变化而变化,虽然已经有研究开始探索团聚体性质对坡面径流挟沙力的影响,但究竟如何量化团聚体与坡面径流挟沙力间的关系,尚需开展大量的控制试验。与土壤分离过程研究、特别是降雨击溅驱动的土壤分离过程相比,坡面径流挟沙力的研究还非常滞后,特别是陡坡条件下挟沙力的研究非常薄弱,研究方法差异较大,试验数据的可比性相对较差,因此,急需开展陡坡坡面径流挟沙力研究方法的比较分析,改进、规范、完善坡面径流挟沙力试验方法体系,为坡面径流挟沙力准确测定及陡坡坡面径流挟沙力方程构建奠定基础。

在坡面和小流域尺度上,泥沙沉积不是土壤侵蚀的主要过程,特别在坡度陡峭的黄土高原丘陵沟壑区更是如此。而黄土高原丘陵沟壑区又是我国土壤侵蚀研究的重点区域,许多土壤侵蚀研究成果都在该区获得,导致我国对泥沙沉积过程的研究非常薄弱。但随着水土流失治理工程的大力实施,无论是坡面措施还是沟道措施,都会引起侵蚀泥沙的局地沉积,特别是淤地坝工程,就是以拦蓄泥沙造地为核心目的,通过分析坝库内泥沙沉积特性,反演小流域侵蚀泥沙来源及其时间变化规律,是近年来土壤侵蚀研究热点之一^[29]。在黄土高原高原沟壑区、黄土高原涧地、淤地坝坝系、东北漫川漫岗区、喀斯特洼地,泥沙沉积过程是影响土壤侵蚀的核心过程,急需加强研究,特别是泥沙特性(如团聚体含量及其稳定性等)和径流水动力学特性(如运动速度等)对泥沙沉积的影响与机理。

土壤分离、泥沙输移与泥沙沉积过程间的耦合关系,是土壤侵蚀过程研究的核心内容,对于土壤分离与泥沙输移的关系。目前有不同的学术观点,但大部分学者认为土壤分离与泥沙输移间存在线性耦合关

系,即当径流输沙率为0时,土壤分离速率最大,为土壤分离能力,随着输沙率增大土壤分离速率呈线性函数下降,当输沙率达到挟沙力时,土壤分离速率为0,可以用Foster和Meyer于1972年提出的线性假定函数定量表征^[30],但这一关系仅在挟沙力控制(即充分供沙)条件下成立,在土壤侵蚀过程中,存在着2个控制条件,分别为分离控制(Detach-limited)和输移控制(Transport-limited)^[2],前者是指下垫面土壤抗蚀性能很强,雨滴击溅和径流冲刷无法提供足够多的泥沙供给径流输移,此时侵蚀量的大小由土壤分离过程控制;而后者是指雨滴击溅和径流冲刷提供了足够的泥沙,但坡面径流挟沙力较小,无法将全部的侵蚀泥沙输移走,此时侵蚀量由泥沙输移过程控制。很多研究者很难理解这2个控制的真正涵义,为了更容易理解,假设降雨降在裸露的基岩上,无论降雨强度、降雨量和径流量多大,都无法在短期内将岩石分离并产生侵蚀泥沙,此时的侵蚀量几乎为0,这属于典型的土壤分离控制案例。假设降雨发生在沙漠内,雨滴击溅会产生大量的松散泥沙,但全部或大部分降雨都会就地入渗,不会产生坡面径流或坡面径流流量很小,挟沙力非常小,无法将雨滴击溅产生的松散泥沙输移走,此时即为典型的泥沙输移控制。随着时空尺度的变化,分离控制和输移控制可能会发生变化,导致侵蚀过程发生变化(图3)。例如,对于细沟间侵蚀,当坡度较小时,雨滴与地面的夹角较大,大部分雨滴动能都消耗于雨滴溅蚀,从而产生大量的松散泥沙,但由于坡度较小,所以坡面径流挟沙力不足,此时侵蚀泥沙的多少受控于输移过程。随着坡度增大,坡面径流挟沙力增大,但雨滴与坡面间的夹角逐渐减小,消耗于雨滴溅蚀的雨滴动能逐渐减小,被分离的泥沙减少,同时径流量增大导致挟沙力增大,当坡度达到某个临界值时,土壤侵蚀过程转变为分离过程控制。当然,由于降水特性、土壤性质、下垫面条件的时空变化,会引起输移控制转变为分离控制的坡度阈值发生变化。在区域尺度上,黄土高原丘陵沟壑区因地形破碎、坡度陡峭,径流挟沙力很大,因此,在黄土高原丘陵沟壑区小流域尺度上,土壤侵蚀属于典型的分离控制,导致小流域多年平均泥沙输移比近似为1。而在东北漫川漫岗地区,因坡面坡度很缓,土壤侵蚀属于典型的输移控制,绝大部分侵蚀泥沙都在坡面下部沉积,导致大江大河(如松花江、辽河等)输沙率或含沙量非常低,对东北漫川漫岗区坡面严重的土壤侵蚀产生错觉。再次强调,由于坡面侵蚀过程可能受控于土壤分离过程,也可能受控于泥沙输移过程,所以无法或者很难用坡面径流小区和侵蚀动床测定的侵蚀量,直接反推土壤分离能力和坡面径流挟沙力。

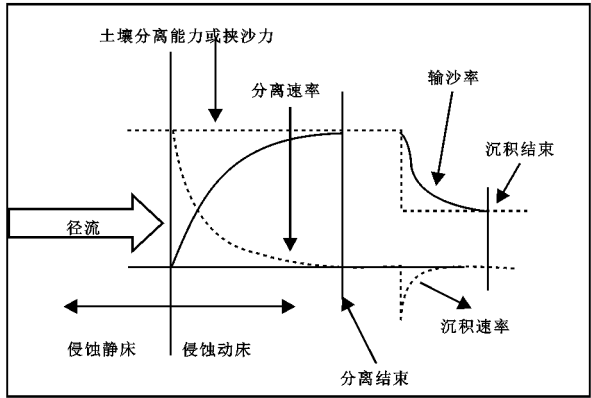


图 3 土壤侵蚀控制过程示意

4 亟待加强的研究内容

除了上面论述过程中涉及的研究内容以外,今后土壤侵蚀研究还需要重点加强的内容为:

(1)细沟网络结构及其时空变化。细沟侵蚀是坡面重要的侵蚀类型,其侵蚀量的大小与细沟网络结构密切相关,目前尚没有建立细沟网络结构演变模型,无法模拟细沟网络的时空分布,在很大程度上影响坡面土壤侵蚀过程模型的构建及其模拟精度,因此需要加强细沟网络及其时空演变过程研究。

(2)切蚀形成与演变动力机制。切沟是坡面和沟坡重要的侵蚀类型,是小流域侵蚀泥沙的重要来源,然而目前对切沟侵蚀动力过程的研究明显不足,特别是切沟形成与发育过程动力机制的研究十分薄弱。加强切沟形成与演变过程动力机制研究,构建切沟侵蚀过程预报模型,作为小流域土壤侵蚀过程模型的重要组成部分,会极大地提高小流域土壤侵蚀过程模型的预测能力。从本质上讲,南方发育的崩岗是一种比较特殊的切沟,因而研究崩岗的思路、理论和方法,应该借鉴切沟的相关研究,其形成与演变过程的动力机制,也应该加强研究。

(3)重力侵蚀形成与发育动力机制。在很多地区都发育有大量的崩塌、浅层滑坡、泥石流等重力侵蚀,因重力侵蚀的发生具有一定的随机性,导致目前对于重力侵蚀的研究相对滞后,应加强重力侵蚀发生的气候、地质、地形、土壤、植被、土地利用方式等临界条件、重力侵蚀演变过程及其动力学机制、重力侵蚀对小流域侵蚀泥沙的贡献及其时空变化特征以及重力侵蚀预报模型等方面的研究。

(4)不同侵蚀类型对小流域侵蚀泥沙的贡献及其动态变化特征。在小流域尺度上,细沟间侵蚀、细沟侵蚀、切沟(浅沟)侵蚀、重力侵蚀并存,在风蚀水蚀交错区,风力侵蚀和水力侵蚀同时存在,而在高纬度和高海拔地区,水力侵蚀、冻融侵蚀,甚至风力侵蚀镶嵌分布,各种侵蚀类型对小流域侵蚀泥沙的贡献大小,直接涉及到水土保持措施的设计与布局,需要加强研究。同时,

随着侵蚀环境的变化,不同侵蚀类型对小流域侵蚀泥沙的贡献可能出现明显的变化,相应的小流域水土保持综合治理策略需要调整,因而需要研究不同侵蚀类型对小流域侵蚀泥沙贡献的时间变化过程。

(5)小流域土壤侵蚀过程模型。以 USLE(Universal Soil Loss Equation)为基础的 CSLE(Chinese Soil Loss Equation)土壤侵蚀模型研发已经取得了长足的进展^[3],有效指导了全国第五次土壤侵蚀普查,但它属于多年平均的经验模型,无法准确反映小流域土壤侵蚀时空分布。因此,构建小流域次降雨土壤侵蚀过程分布式模型是当前土壤侵蚀模型研发的重点。应充分利用地理信息系统流域计算功能,吸收国内外土壤侵蚀机理与过程研究成果,借鉴国内外土壤侵蚀过程模型研发的经验,开发小流域次降雨土壤侵蚀过程模型,更好地指导小流域水土保持综合治理。除水力侵蚀或坡面侵蚀外,模型中应同时包括切沟侵蚀模块、重力侵蚀模块、积雪消融模块和作物生长模块,也要借鉴河流动力学思路,在沟道或河流尺度上,充分应用水文学、水力学及河流泥沙运动力学的相关模型,做到不同空间尺度的无缝衔接,实现真正意义上的小流域次降雨土壤侵蚀过程模拟与预报。

(6)复合侵蚀动力过程与模拟。如前文所述,在风力水力复合侵蚀区、高纬度地区和高海拔地区,存在着风水复合侵蚀、水力冻融复合侵蚀、风力冻融复合侵蚀以及风力水力冻融复合侵蚀,与单纯的水力侵蚀和风力侵蚀相比,目前对复合侵蚀的研究相对滞后,究竟是时间的交替,还是时间上的交错,是过程的叠加,还是机制的耦合,这些都不清晰。复合侵蚀区占的空间比例很大,侵蚀过程更复杂,影响因素与机制更多样。但开展复合侵蚀动力过程研究,是对区域尺度土壤侵蚀时空分异特征的有益补充,也是国家土壤侵蚀普查与调查的需求,亟待通过多学科交叉与持续的科技攻关,力争有所突破。

(7)变化环境下小流域土壤侵蚀响应与机理。在全球气候变化、重大生态工程建设、沙漠化防治、城市化等自然过程和人类社会活动的驱动下,区域土壤侵蚀环境会发生重大转变,例如“退耕还林(草)”工程的有效实施,就显著改变了植物群落的近地表特性,植物类型、群落结构、生物结皮、枯落物、根系系统及土壤理化性质都发生了显著变化,而这些因素又与土壤侵蚀过程密切相关,总体趋势是土壤侵蚀动力下降和土壤侵蚀阻力提升,其结果必然是土壤侵蚀强度的降低。全球气候变化导致的暴雨和干旱频率增大,无论是对水力侵蚀,还是风力侵蚀都具有重要影响。而全球气候变化导致的区域温度上升,更是彻底改变了高纬度和高海拔地区的生态、水文过程,冻融侵蚀必然

会发生强烈的响应。不同类型的土壤侵蚀对侵蚀环境变化的响应程度与机制可能存在明显差异,因此需要分区域、分侵蚀类型有序地开展相关研究。

(8)小流域土壤侵蚀环境效应。经常听有些学者讲,非点源污染不属于土壤侵蚀研究范畴,这是长期以来土壤侵蚀研究偏重物理过程的必然结果。作者认为,小流域土壤侵蚀环境效应不但要做,而且急需加强。在片面追求产量和卖相等经济因素驱动下,很多地方都超量施用化肥、农药、杀虫剂、除草剂等,造成多种污染物的大量流失,严重影响地表水体质量,造成水质性水资源短缺,因而要加强小流域不同污染物迁移、转化与富集过程与机理研究,同时应强化小流域土壤侵蚀对土壤碳库、碳源—碳汇潜在影响的相关研究,实现非点源污染物迁移过程模拟,并与土壤侵蚀过程模型耦合或集成,有效模拟小流域土壤侵蚀环境效应。

(9)土壤侵蚀研究方法体系。与其他学科一样,土壤侵蚀研究的进步离不开研究方法体系的革新,除了传统的样点调查、径流小区监测、把口站观测、人工模拟降雨和变坡实验水槽等以外,应充分利用CT扫描、激光扫描、GPS、探地雷达、摄影测量、遥感监测、地理信息系统、数据远程传送、模型模拟等研究方法与技术,更精细、更准确、更实时地监测、观测土壤侵蚀过程。不同方法监测结果的对比分析研究也需要加强,便于提高监测结果的可靠性和普适性。重力侵蚀、切沟侵蚀、冻融侵蚀的监测方法体系,亟待改善与革新。

(10)数据收集、积累与共享。数据是目前土壤侵蚀研究的瓶颈,在很多情况下由于缺乏可靠的数据,限制了许多学术思想、研究理念、计算方法与模型构建的实施与研发。因此,急需加强土壤侵蚀调查、监测、试验数据的收集、积累和共享。土壤侵蚀研究是个典型的多要素、多过程和多尺度问题,需要充分收集相关学科的数据与成果,作为土壤侵蚀研究的基础数据,分析土壤侵蚀动力过程与机理。同时要充分利用元数据分析与高分遥感数据,借鉴云计算和大数据的思路和理念,加强不同时空尺度数据的同化与融合,为研究流域和区域土壤侵蚀分异特征奠定基础。

最后需要说明的是,本文不是综述文章,是作者学术思想的总结和凝练,因此主要引用了作者已经发表的若干相关文章作理论支持,没有大量引用其他同仁的文献还请谅解。土壤侵蚀研究涉及的要素、过程与尺度很多、很复杂,本文的观点不一定正确或全面,欢迎讨论,相互学习、共同进步,促进土壤侵蚀学科发展。

参考文献:

- [1] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
[2] 余新晓,张光辉,史志华,等.水土保持学导论[M].北京:

科学出版社,2019.

- [3] 刘宝元,谢云,张科利.土壤侵蚀预报模型[M].北京:中国科学技术出版社,2001.
[4] 郑粉莉,江忠善,高学田.水蚀过程与预报模型[M].北京:科学出版社,2008.
[5] 雷廷武,张晴雯,闫丽娟.细沟侵蚀物理模型[M].北京:科学出版社,2009.
[6] 王万忠,焦菊英.黄土高原降雨侵蚀产沙与水土保持减沙[M].北京:科学出版社,2018.
[7] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Soil erodibility as impacted by vegetation restoration strategies on the Loess Plateau of China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44: 796-807.
[8] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J]. Catena, 2005, 63: 132-153.
[9] Nyssen J, Veyret P, Poesen J, et al. The effectiveness of loose rock check dams for gully control in Tigray, northern Ethiopia[J]. Soil Use and Management, 2004, 20: 55-64.
[10] 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: 1811-1819.
[11] Zhang G H, Xie Z F. Soil surface roughness decay under different topographic conditions[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 187: 92-101.
[12] 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J].土壤学报,2002,39(6):882-886.
[13] 张光辉.坡面水蚀过程水动力学研究进展[J].水科学进展,2001,12(3):395-402.
[14] 曹颖,张光辉,唐科明,等.地表覆盖对坡面流流速影响的模拟试验[J].山地学报,2011,29(6):654-659.
[15] Zhang G H, Luo R T, Cao Y, et al. Impacts of sediment load on Manning coefficient in supercritical shallow flow on steep slopes[J]. Hydrological Processes, 2010, 24: 3909-3914.
[16] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67: 713-719.
[17] 栾莉莉,张光辉,王莉莉,等.基于水流功率的坡面流挟沙力模拟[J].泥沙研究,2016(2):61-67.
[18] Zhang G H, Tang K M, Ren Z P, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013, 56(3): 927-934.
[19] Liu F, Zhang G H, Wang H. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2016, 41: 875-883.
[20] Wang L J, Zhang G H, Wang X, et al. Soil loss:

- Effects of plant litter incorporation rate under simulated rainfall conditions[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30: 1293-1302.
- [21] 李宁宁, 张光辉, 王浩, 等. 黄土丘陵沟壑区浅层滑坡堆积体植被演替特征及土壤养分响应[J]. *山地学报*, 2018, 36(5): 669-678.
- [22] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38: 1725-1734.
- [23] Zhang B J, Zhang G H, Yang H Y, et al. Temporal variation in soil erosion resistance of steep slopes restored with different vegetation communities on the Chinese Loess Plateau[J]. *Catena*, 2019, 182: 104170.
- [24] 张光辉. 退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(4): 143-154.
- [25] Zhang G H, Tang K M, Zhang X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34: 1302-1309.
- [26] Zhang G H, Liu G B, Tang M K, et al. Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2008, 51(3): 883-890.
- [27] 李智广, 张光辉, 刘秉正, 等. 水土流失测验与调查[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [28] Zhang X C, Zhang G H, Garbrecht J D, et al. Dating sediment in a fast sedimentation reservoir using Cesium-137 and lead-210[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 948-956.
- [29] 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.
- [31] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. Sediment feedback relationship[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1298-1304.
- [31] Sun L, Zhang G H, Fa L, et al. Effects of incorporated plant litter on soil resistance to flowing water erosion in the Loess Plateau of China[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 147: 238-247.
- [32] 张光辉. 土壤分离能力测定的不确定性分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 1-6.
- [33] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1291-1297.
- [34] 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.
- [35] 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.
- (上接第 20 页)
- [15] 何玉广, 信忠保, 余新晓, 等. 模拟降雨条件下侧柏林地枯落物对坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 27-32, 38.
- [16] 王栋栋, 王占礼, 张庆玮, 等. 草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 119-125.
- [17] 白玉洁, 张风宝, 杨明义, 等. 急陡黄土坡面土壤剥蚀率变化的水动力学机制研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 1-6.
- [18] 刘晓燕, 刘昌明, 党素珍. 黄土丘陵区雨强对水流含沙量的影响[J]. *地理学报*, 2019, 74(9): 1723-1732.
- [19] 林姿, 史东梅, 姜义宝, 等. 岩溶区煤矿工程堆积体边坡细沟发育及其水沙关系研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 615-626.
- [20] 张攀, 姚文艺, 唐洪武, 等. 黄土坡面细沟形态变化及对侵蚀产沙过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 114-119.
- [21] He J J, Sun L Y, Gong H L, et al. Laboratory studies on the influence of rainfall pattern on rill erosion and its runoff and sediment characteristics[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(5): 1615-1625.
- [22] 廖义善, 卓慕宁, 谢真越, 等. 崩岗崩积体坡面产沙与坡面形态的耦合影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 66-72.
- [23] 陈心逸, 李丽, 余冬立. 砾石覆盖条件下盐碱土边坡降雨侵蚀水动力学特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 116-120.
- [24] 吴淑芳, 刘政鸿, 霍云云, 等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 48-56.
- [25] 郭慧莉, 孙立全, 吴淑芳, 等. 黄土高原地区鱼鳞坑坡面侵蚀演化过程及水力学特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1125-1135.
- [26] 翟艳宾, 吴发启, 王健, 等. 不同人工糙率床面水力学特性的试验研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(6): 38-42.
- [27] 王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 110-117.
- [28] 王小燕, 李朝霞, 徐勤学, 等. 砾石覆盖对土壤水蚀过程影响的研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1): 115-120.