

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.04.015 CSTR:32310.14.stbcb.2025.04.015

张攀, 韩志刚, 吴冰, 等. 黄土高原重力侵蚀过程与模拟研究进展及展望[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4):1-11.

ZHANG Pan, HAN Zhigang, WU Bing, et al. Research progress and prospect of gravitational erosion processes and simulation on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):1-11.

黄土高原重力侵蚀过程与模拟研究进展及展望

张攀^{1,2}, 韩志刚³, 吴冰⁴, 张羽飞^{1,2}

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 水利部黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 450003; 3. 河南大学地理与环境学院, 河南 开封 475000; 4. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安 710000)

摘要: [目的] 系统总结黄土高原重力侵蚀的研究进展, 并提出未来需要解决的关键科学问题和研究方向, 以为流域重力侵蚀过程模型构建与黄土高原精准治理提供参考。[方法] 综述重力侵蚀的观测与识别方法、动力与随机过程、水沙产输过程模拟及流域重力侵蚀模型构建等, 特别是机载激光 LiDAR 技术的应用、基于土力学的边坡失稳模式和重力侵蚀的简化模型, 分析现有研究中存在的观测方法功能单一、未考虑重力侵蚀随机性、缺乏重力侵蚀-水沙产输过程模拟方法等问题。[结果] 目前, 国内外在重力侵蚀单过程观测识别、重力侵蚀成因与经验评估等方面取得一定进展, 但重力侵蚀全过程高精度观测识别、发生发展动力学机制及其过程模拟仍然是突出的薄弱环节。[结论] 今后需要重点解决的若干关键科学问题, 包括重力侵蚀“发育-启动-运移-堆积”全过程观测识别、动力-随机耦合机制、多级沟道重力侵蚀-水沙产输过程模拟等研究方向。

关键词: 重力侵蚀; 动力过程; 水沙产输; 驱动因子; 研究进展

中图分类号: S265.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)04-0001-11

Research Progress and Prospect of Gravitational Erosion Processes and Simulation on the Loess Plateau

ZHANG Pan^{1,2}, HAN Zhigang³, WU Bing⁴, ZHANG Yufei^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau of Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 3. School of Geography and Environment, Henan University, Kaifeng, Henan 475000, China; 4. School of Human Settlements and Architectural Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China)

Abstract: [Objective] To systematically summarize the research progress on gravitational erosion on the Loess Plateau and propose key scientific issues and research directions that need to be addressed in the future, with the aim of providing references for the construction of watershed gravitational erosion process models and precise management of the Loess Plateau. [Methods] Based on previous research, this paper reviewed the observation and identification methods of gravitational erosion, dynamics and stochastic processes, simulation of sediment production and transport processes, and construction of watershed gravitational erosion models, with a particular emphasis on the application of airborne LiDAR technology, slope instability models based on soil mechanics, and simplified models of gravitational erosion. It also highlighted existing issues in current research, such as the limited functionality of observation methods, the lack of consideration for the stochastic nature of gravitational erosion, and the absence of simulation methods for gravitational erosion-sediment yield and transport processes. [Results] At present, progress has been made both domestically and internationally in the observation and identification of single processes of gravitational erosion, as well as in the assessment of its causes and empirical evaluation.

收稿日期: 2025-02-09 修回日期: 2025-03-30 录用日期: 2025-04-15 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-05-16

资助项目: 国家自然科学基金黄河水利科学研究联合项目(U2443214); 河南省自然科学基金项目(242300421042)

第一作者: 张攀(1982—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事土壤侵蚀机理与模拟研究。E-mail: zpyrcc@163.com

通信作者: 张攀(1982—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事土壤侵蚀机理与模拟研究。E-mail: zpyrcc@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

However, high-precision observation and identification of the entire processes of gravitational erosion, along with the dynamic mechanisms of its occurrence and development, as well as process simulation, remain prominent weak points. [Conclusion] The review proposes several key scientific issues that need to be addressed in the future, including research directions such as the observation and identification of the entire processes of gravitational erosion ('development-initiation-transport-accumulation'), the dynamic-stochastic coupling mechanisms, and the simulation of gravitational erosion-sediment production and transport processes in multi-level gullies.

Keywords: gravitational erosion; dynamic processes; water and sediment production and transport; driving factors; research progress

Received: 2025-02-09

Revised: 2025-03-30

Accepted: 2025-04-15

Online(www.cnki.net): 2025-05-16

重力侵蚀是黄土高原主要的侵蚀类型之一,也是流域产沙的重要途径。重力侵蚀是地表物质在重力直接驱动下发生的移动过程,此过程通常需要水力等其他外营力的协同作用,主要以崩塌、滑坡为主,兼有泻溜、剥落等类型^[1]。黄土高原经过多年治理,实现水土流失面积、强度双下降,但沟道重力侵蚀依然严重^[2],根据观测^[2],黄土高原大部分水土流失区的沟道侵蚀面积仍约占总侵蚀面积的60%,沟道侵蚀量也占流域侵蚀总量的60%左右。黄土高原坡陡沟深、土壤垂直节理发育,长度>500 m的沟道有66.67万条,坡度>25°的面积占50%以上^[3],呈现突发性、易发性和季节性等突出特点。随着黄土高原水土流失治理工作的深入,尤其是退耕还林还草工程的实施,使黄土高原植被覆盖度显著提升,但恢复效果存在空间异质性,以坡顶和缓坡区域较为显著,但沟坡和沟头的陡坡部位恢复效果不甚理想,该部位受水力和重力双重作用一遇暴雨或长历时降雨极易发生重力侵蚀^[4-5]。

近年来,在全球气候变暖的大背景下,黄河流域极端暴雨呈现多发态势,使得重力侵蚀问题更加凸显。延河流域2013年7月极端连续降水引起的沟坡崩塌、滑坡多达8 135处,重力侵蚀强度达7 300 t/km²^[6],无定河流域2017年“7·26”暴雨新增切沟体积平均达到1 127 m³/km²^[7];马莲河流域2022年7月暴雨导致庆城县在2~3 km²的小流域内发生重力侵蚀31~39处。然而,由于重力侵蚀的随机突发性特点,且地貌—植被—侵蚀—气候耦合关系非线性突出,现有常规的监测技术方法难以实现对其“发育—启动—运动—堆积”全过程的监测,对其测量的过程性、时效性和精度难以满足重力侵蚀机理与模拟研究的基本要求,致使基础观测数据不足,侵蚀产沙机制研究不够系统,数值模拟发展相对滞后,是当前黄土高原土壤侵蚀研究的重点和难点,也成为制约黄土高原生态保护与高质量发展的

瓶颈。

因而,系统总结目前国内外关于黄土高原重力侵蚀的研究进展,评述研究中存在的难点和问题,对促进黄土高原重力侵蚀过程与模拟研究是非常必要的。为此,本文在前人研究成果基础上,结合作者在该地区的研究,对国内外关于黄土高原重力侵蚀观测识别、过程机理、模拟方法等进行综述,总结研究中存在的主要问题,并展望未来研究方向,力求为流域重力侵蚀过程模型构建与黄土高原精准治理提供参考。

1 黄土高原重力侵蚀研究进展与存在问题

1.1 重力侵蚀观测与识别方法

开展重力侵蚀过程观测是水土保持战略决策和相关研究的基础。我国的重力侵蚀观测起步于20世纪80年代^[8],传统的方法多采用在选定的断面进行人工现场布点、定期观测或加密观测的方法进行^[9-10]。对小尺度区域的重力侵蚀观测主要采用标桩法和测钎法^[11-12]。而对于较大范围的重力侵蚀评估,研究者通常采用的方法有:1)基于实地调查和统计数据估算^[13];2)利用小比例尺地图或航拍/卫星影像进行对比分析。然而,此方法存在明显局限性,如测量精度难以保证、侵蚀类型不易判别且难以准确关联诱发因素。部分学者^[14]尝试采用替代方法,如通过“碳法”测定阶地年龄来推算沟道后退速率,或利用GPS监测砒砂岩区沟缘线变化来反演侵蚀量^[15]。但此技术手段获取的数据精度有限,仅适用于估算重力侵蚀的长期平均效应。20世纪90年代以来,国内外学者^[16-18]开始将三维激光扫描技术、定位摄影测量技术和地貌仪法应用于土壤侵蚀地形变化观测试验。相比早期观测技术,此类方法在测量效率和精度方面大大提升,但受观测范围及降雨对激光回波信号的影响,对观测环境要

求较高,多适用于室内小尺度模型试验和定点观测,难以在野外自然条件下进行大范围推广,从而限制在重力侵蚀观测中的应用^[19-20]。

近年来,遥感技术的发展促进大尺度及复杂立地条件下的重力侵蚀观测,随着遥感数据在空间、光谱和时间分辨率等方面的提高,使得基于高分辨率地形数据的侵蚀过程变化观测越来越普遍,载波相位差分技术(RTK)、合成孔径雷达(SAR)、航空摄影测量、机载激光扫描测量(ALS)、地面三维激光扫描(TLS)等先进方法不断被运用到重力侵蚀观测与识别中^[21-22],基于高精度地形数据的地表变化监测已然成为重力侵蚀观测研究的重要方法。其中,航空摄影测量和SAR可覆盖大面积区域,但垂直精度有限,且无法穿透植被。基于全站仪或RTK等测量仪器获取的高程精确,但点密度低,限制高分辨率数据的生成^[23]。ALS和TLS(统称为LiDAR)具备穿透植被的能力,利用激光测距原理测得三维坐标值,获得密集点云数据,构建高精度三维立体可视化模型^[24-25],不仅可定量快速获取重力侵蚀类型、数量、规模、侵蚀速率和侵蚀量等发育过程特征^[26],也可根据地理算法明确重力侵蚀发生和堆积的空间分布^[27-28],区分重力侵蚀类型和发育阶段,通过重复观测同一区域,实现重力侵蚀过程的动态监测。随着机载激光LiDAR技术日趋成熟,其显著优势体现在测量精度高、响应速度快、多源数据兼容性好及实时性强等特点,已逐渐成为地表变化过程观测的重要数据源,为实现重力侵蚀过程的实时动态测量奠定基础。

随着计算机视觉图像处理的发展与遥感影像分辨率的提高,机器学习模型逐渐被应用于重力侵蚀特征参数识别中^[29]。该模型主要利用计算机程序模拟人的学习能力,从实际数据中总结、学习重力侵蚀特征,进行推断和决策,进一步预测研究区域的重力侵蚀发生发展状况。部分学者^[30]开始应用深度学习语义分割模型,提取目标在待分类影像中的位置、边界、面积等信息,目前主流的语义分割模型有DeepLab、FCN、UNet、PSPNet等^[31-32]。但深度学习在遥感分类提取中的应用起步较晚,目前主要集中在特征显著的地物提取上,多依赖于高分辨率遥感影像和大量有关地物的标签数据集,且主要集中于真彩色图斑提取,对于黄土丘陵沟壑区这种复杂地形下的重力侵蚀特征尚有待发掘运用。

1.2 重力侵蚀的动力与随机过程

重力侵蚀的触发机制、演化路径及形成过程具

有高度复杂性,是多种驱动因子非线性交互作用的综合体现。从成因机制角度,其影响因素可分为内源性和外源性2类。前者涵盖黄土物质组成、软弱层位、结构面特征及地形条件等固有属性;后者包括气象水文条件、植被和人为干扰等多重外部作用^[33-34]。内因主导着土体的固有抗剪能力,为重力侵蚀创造潜在条件;外因则通过动态改变土体强度特性和受力平衡,促使侵蚀过程实际发生^[35]。其中,降雨是诱发重力侵蚀的重要外因,重力侵蚀发生的频率、规模与降雨量和降雨强度均有直接关系,降雨量越高,小规模重力侵蚀发生的频率越高,但重力侵蚀过程与降雨量间不是简单的比例关系,同时受到降雨强度和降雨量的影响^[36-37];植被对重力侵蚀的影响呈正相关和负相关,可起到抑制与促发重力侵蚀的作用,短期内植被增加小规模表层重力侵蚀速率,长期来看,减缓重力侵蚀的发展。总体来说,植被覆盖地区重力侵蚀量的增加幅度小于裸土地区^[38]。土壤性质是决定沟道发育的内在因素之一,不同土体的各项理化、力学性质存在差异,进而影响侵蚀发育形态、速率和规模^[39-40];地形地貌发育阶段决定内外力的强弱,汇水面积、坡度、坡形、沟头高度等因子显著影响重力侵蚀过程^[41-42]。

现有研究^[1]主要依托动力理论体系,通过耦合坡体稳定状态、应力应变场分布及土体物理性质等要素,实现对重力侵蚀动力学机制的阐释。陕北地区的观测表明,崩塌和滑塌等重力侵蚀主要发生在强度较大的降雨后,与土体结构强度的下降及非饱和土体吸附强度的减小等关系密切^[43]。重力侵蚀机制并非多种影响因素的简单叠加,而是受到多种影响因素的综合影响。随时空尺度变化,重力侵蚀影响因素、驱动机制各不相同,表现出非线性变化规律,重力侵蚀的触发机制源于多因素间的动态耦合作用,当任一影响因子突破临界阈值时,即可能主导整个侵蚀过程,从而影响重力侵蚀强度、速率、规模等特征^[44,10],但目前对重力侵蚀主控因子及各因素间的相互作用和转换关系尚不明了,成为制约黄土高原重力侵蚀数学模型发展的重要原因。

单个重力侵蚀的发生从本质上可归为土力学上的沟坡稳定性问题,其临界条件是不稳定土体的滑动力超过滑动面的抗剪力,在重力及其他触发因素作用下从沟坡上逐渐剥离的过程^[45]。土体类型、干密度和水分体积分数是决定土体力学特性的关键参数,直接影响其结构强度、抗剪强度、黏聚力及内摩擦角等力学指标。根据野外观测,黄土沟坡上

的浅层重力侵蚀主要发生在降雨后的一段时间内,水分入渗深度达到滑塌面、土壤水分体积分数增大、土体黏聚力下降是重要的触发因素^[46]。黄土具有纳观—微观—细观—宏观跨尺度结构特征,外部扰动下不同尺度结构间相互作用、转换,其渗流、变形和强度特性也随之变化^[39]。由于黄土的亚稳定结构,遇水时其结构劣化,土壤黏结强度迅速降低,此特性为黄土重力侵蚀提供有利条件。水动力作用下经历多尺度结构劣化—物理动力性质弱化—变形破坏过程,进而影响黄土沟道重力侵蚀^[47]。然而,当前对于黄土多尺度结构特征和水动力对黄土重力侵蚀的影响机理仍认识不清,对重力侵蚀发生的动力临界和触发条件还有待揭示。

在重力侵蚀模型构建方面,动力模型多倾向于将重力侵蚀处理为符合一定概率分布模式的边坡失稳问题^[48],而在流域尺度上,环境的不确定性导致重力侵蚀发生的随机性,重力侵蚀过程中土体下滑力和滑动面的抗剪切能力均处于复杂的动态调整中,从而导致失稳规模和形式都具有很强的不确定性。例如,作为侵蚀重要驱动力的降雨事件,其本身的随机性构成侵蚀环境不确定性的重要组成部分。正是该复杂环境的不确定性,对于深入了解重力侵蚀发生机理和提高重力侵蚀模型模拟精度构成极大挑战。因此,寻找一个合理的评估体系来分析环境随机性如何影响重力侵蚀不确定性就显得非常必要。现阶段建立的动力模型多未充分考虑重力侵蚀的随机性特征,部分学者^[40-50]采用以概率为特征的随机方法(包括 Poisson 概率分布模型、Pareto 概率分布模型和 Bayes 概率模型等)对滑坡、洪水及泥石流等随机特征进行研究,但目前对于重力侵蚀速率、规模在复杂环境因素影响下的随机特征研究还较为缺乏。

1.3 重力侵蚀—水沙产输过程模拟

重力侵蚀是黄土丘陵沟壑区流域产沙的重要来源,通过直接或间接方式向沟道输送大量泥沙,因此,建立重力侵蚀模型、预测重力侵蚀量对于科学预测入黄泥沙变化尤为重要。现有研究多采用经验参数、统计模型或概化的物理机制模型刻画重力侵蚀产沙过程。

国外通用土壤流失方程(USLE)及修正的土壤流失方程(RUSLE)主要适用于缓坡地形,没有反映重力侵蚀的影响因素^[51-52]。国内不少学者^[53-54]在建立黄土高原地区土壤侵蚀方程时,虽然也考虑重力侵蚀的因素,但大多是在流域土壤侵蚀模型中赋

予有关重力侵蚀影响的经验参数反映其侵蚀作用。也有学者^[55]通过集成模糊数学聚类、地貌计量分析、灰色预测、回归分析和概率密度函数等多种统计方法,构建产沙—径流响应函数,实现重力侵蚀区域的有效划分发现,重力侵蚀事件的发生概率随崩滑体规模的增大呈幂律递减趋势,初步阐释重力侵蚀的群集分布特性。然而,传统统计模型受限于样本数量不足和经验性假设,未能充分表征重力侵蚀的动态演化过程,可移用性差。

为克服统计模型的不足,研究者转向物理机制模型(如黄河数字流域模型、WEP 系列模型及 THIHMS-SW 模型等),基于重力侵蚀动力学原理,从时空尺度、输入输出变量、控制方程等维度构建模拟水文—侵蚀—输沙过程的颗粒运动物理方程^[48,56-57],并整合水动力学与土力学理论开展沟坡动力响应分析,得到滑坡侵蚀的简化模型。部分学者^[58-59]基于 TRIGRS 与 SINMAP 耦合建模方法,将水文模型与斜坡稳定理论相结合,开展暴雨条件下浅层滑坡易发性评价,为重力侵蚀量化分析提供基础。但缺乏对降雨—重力侵蚀—水沙产输全过程的观测分析,限制对重力侵蚀产输沙过程的认识,导致目前重力侵蚀对流域水沙输移的贡献并未在模型计算方法中得到足够体现。

流域水沙输移受到地质、地貌、气候、植被和人类活动等因素的综合影响,具有复杂的尺度效应。在降雨—径流—泥沙物质迁移转换和驱动下,不同空间尺度地貌单元水沙传输相互耦合,形成一个复杂的泥沙运动系统。随时空尺度变化,水沙传输影响因素、驱动机制各不相同,表现出非线性变化规律,同时,水沙传输过程主控因子、耦合关系也随之发生改变^[60-61]。在侵蚀过程从坡面到流域的尺度扩展中,泥沙产生与输移特征将发生系统性转变^[62]。坡面尺度以击溅、细沟等低强度侵蚀为主,产沙贡献较小^[63-64];而流域尺度因沟道侵蚀和重力侵蚀的加入,泥沙产输强度显著提升。该转变伴随着流域功能区从泥沙源区向输移—沉积区的过渡^[65-67]。泥沙产输出过程的主控因子呈显著的尺度依赖性。在坡面尺度($10^{-6}\sim 10^{-2}$ km²),主要受制于土壤可蚀性、植被覆盖度和微地形特征;在子流域尺度($10^{-2}\sim 10$ km²),沟道网络发育程度和泥沙输移—沉积平衡成为关键限制因素;而在流域尺度(>10 km²),则主要受降雨空间异质性、能量耗散机制和泥沙输运能力等因素调控^[68-69]。

重力侵蚀对流域水沙连通性具有重要影响。

研究显示,小型浅层滑坡和崩塌具有双重效应,一方面改变径流网络,提高水文连通度;另一方面,提供丰富的可移动泥沙来源,共同促进泥沙连通性增强。然而,大型重力侵蚀事件由于产生大量堆积物堵塞沟道,反而削弱水沙输移能力^[70]。重力侵蚀发生的随机性必然引起流域水沙连通的随机性,使流域水沙传输过程的空间分异特征更加复杂,而目前对重力侵蚀影响下的流域水沙传递关系不明,在重力侵蚀对流域水沙级联传输过程的模拟研究方面还相当薄弱。

1.4 流域重力侵蚀模型构建

重力侵蚀模型的构建涉及降雨、地形、土壤、植被、水土保持措施等多因子、多源、多时相异构数据,如何实现其集成管理与高效访问一直是亟待解决的难题。随着对地观测大数据时代的到来,对地观测领域中面向分析就绪的数据集成范式逐渐进入人们视野^[71]。时空立方体作为分析就绪处理范式的关键技术突破,克服传统处理模式的技术限制。该技术依托高性能计算存储架构,整合分析就绪型数据(ARD),通过统一的时空参考框架,实现海量对地观测数据的快速发现、访问和大规模分析。新一代范式下,对地观测领域涌现出一批时空立方体基础设施,如欧盟推出的地球服务数据立方体^[72]、CEOS倡议的开源数据立方体和欧空局发布的地球系统数据立方体及巴西对地观测数据立方体等^[73-74],此数据模型和处理范式为重力侵蚀建模的数据管理服务提供新的集成方法。

集成重力侵蚀计算的流域土壤侵蚀预测预报以模型的高效计算为基本前提。目前,国内外学者^[75-78]在流域土壤侵蚀模型方面做大量研究工作,设计开发包括 USLE、CSLE、WEPP、LISEM、RHEM、EU-ROSEM 等在内的多个经验模型与机理模型。为实现土壤侵蚀模型的高效计算,基于 MapReduce 计算模型开发 ST-Hadoop、GeoSpark、Sedona 等时空大数据处理平台^[79-80],该平台在时空数据快速分析与高效计算方面具备显著优势,并可通过服务接口抽象与封装,基于云平台对外提供计算服务^[81-82]。从模型耦合的角度,当前研究^[83-84]主要集中于计算机信息技术、GIS、遥感技术与土壤侵蚀模型的耦合,涉及多源数据与多个计算子过程,往往采用组件式 GIS 进行模型开发,但在开展流域土壤侵蚀预测预报时缺乏对沟道重力侵蚀计算的耦合,缺少集成重力侵蚀过程的土壤侵蚀模拟系统,难以解析重力侵蚀对流域水沙过程的影响作

用,尚不能满足新时代水土流失预测预报的科技需求。

近年来,随着计算机算力的不断提升与训练数据的不断丰富,机器学习方法已被成功应用于土壤侵蚀及相关领域^[85]。使用决策树方法进行水蚀敏感性制图的研究表明,机器学习模型具有良好的可靠性^[86]。将随机森林、支持向量机和朴素贝叶斯模型一起应用于流域冲沟侵蚀敏感性预测发现,随机森林模型的性能最优^[87]。通过构建训练样本集,数据驱动的神经网络模型在土壤侵蚀过程模拟中应用也逐步发展^[88-89],并在模拟过程中开展土壤侵蚀物理机制耦合的尝试。一方面,可结合机理模型计算额外特征,并与观测值集成构建训练样本集;另一方面,也可通过在损失函数中添加一个偏置函数,以优化模型训练过程^[90]。人工智能模型可在全球数据集上进行训练,在流域洪水预测特别是缺乏观测数据的流域具有显著优势,神经网络等机器学习方法在改进流域水沙传输过程模拟方面具备显著应用潜力^[91]。

因此,要构建流域重力侵蚀模型,就需要基于重力侵蚀全过程观测与识别,揭示重力侵蚀发生的动力临界和触发条件,建立基于动力-随机变量关系的重力侵蚀特征方程,辨识重力侵蚀影响下的流域多级地貌单元水沙传递关系。在此基础上,研发沟道重力侵蚀过程计算模块,并嵌入土壤侵蚀机理模型,融合基于重力侵蚀的沟道泥沙输移模拟模块,完善流域多级沟道水沙级联传输模块,从而构建流域重力侵蚀过程集成化模拟模型。

2 研究中存在的主要问题

黄土高原重力侵蚀影响因素多,随机突发性强,地貌-植被-侵蚀-气候耦合关系非线性突出,现有对重力侵蚀过程和发生机制的研究成果仍然难以支撑水土流失状况精准模拟与评估要求。为此,对其不足问题需要引起更多的关注。

1)传统重力侵蚀测量方法原理简单,数据采集及分析处理难度不大,易于上手。然而,在重力侵蚀发生时,很难捕捉到其临界状态,测量的时效性与精度处于相对较低水平。此外,监测所获的重力侵蚀数据,很难与降雨、土壤水分变化等过程实现精确匹配^[92]。现有重力侵蚀观测方法功能单一,仅靠单一技术方法很难对其“发育-启动-运移-堆积”进行全过程精准观测,使得重力侵蚀过程模型模拟研究无法深入。因此,需要充分利用现有观测技术方法和数据处理能力,通过多种观测技术的功

能协同,研发多技术融合、观测范围更广、数据处理更快、过程精度更高的重力侵蚀全过程观测方法,构建完善的重力侵蚀观测标准数据库,是推进重力侵蚀机理研究和模型研发的基础。

2)重力侵蚀受多种影响因素耦合作用,是一个具有动力意义的随机过程。现有研究对重力侵蚀主控因子及各因素间的作用和转换关系尚不明了,缺乏对重力侵蚀动力过程与随机过程的耦合研究,建立的模型未充分考虑重力侵蚀的随机性特征。因此,亟待揭示重力侵蚀发生的动力临界和触发条件,探明重力侵蚀动力—随机耦合过程,构建基于动力过程与随机过程的重力侵蚀特征方程,为提高重力侵蚀模拟与评估精度提供支撑。

3)目前,土壤侵蚀模型对黄土高原重力侵蚀严重的特征并未在计算方法中得到足够体现,导致土壤侵蚀模型的研发受到重力侵蚀基本规律认知瓶颈问题的制约。因此,阐明黄土高原重力侵蚀空间分布特征与分异规律,揭示重力侵蚀发生的动力学机制和动力临界,研究重力侵蚀的动力作用与随机过程的关联机制,建立重力侵蚀发生的特征方程与产沙量估算方法,是推进流域侵蚀产沙模型研发与应用迫切需要突破的科学问题。

4)重力侵蚀的发生改变流域产汇流和产输沙下垫面边界,深刻影响着流域水沙的连通性,使水沙级联传输过程变得更为复杂。以往研究大多关注重力侵蚀本身的规模、体积、侵蚀量等,而对重力侵蚀影响下“坡面—沟道—流域”水沙传输过程的研究尚为缺乏,未能建立流域多级地貌系统重力侵蚀—水沙产输过程模拟方法。因此,探明重力侵蚀影响下的流域水沙级联传输关系,提出重力侵蚀—泥沙输移过程的定量模拟方法,是建立重力侵蚀模型、评估重力侵蚀对流域水沙输移贡献的核心问题。

5)目前大多数土壤侵蚀模型缺乏对重力侵蚀过程的模拟,也难以定量反演重力侵蚀—水沙产输的耦合过程,严重影响流域水土流失模拟与评估的精度,无法满足对重力侵蚀过程预测预报的科技需求。因此,亟需建立嵌入沟道重力侵蚀过程的土壤侵蚀模型,研究多元关键模块的耦合方法,开发包括重力侵蚀过程的土壤侵蚀模型优化算法,是数字孪生黄河建设和黄土高原水土保持高质量发展的迫切需求。

3 研究展望

由于对重力侵蚀基础观测资料缺乏,对其发生

发展过程及动力学机制研究不够,成为制约黄土高原生态保护与高质量发展的瓶颈,也是黄河流域生态治理的“最后一公里”。因此,研究黄土高原重力侵蚀发生发展过程及对流域产沙贡献,可为预测入黄泥沙变化、科学评估生态治理效果、优化治理工程布局提供精准支撑。为此,针对重力侵蚀过程复杂、观测识别困难、模拟预测方法缺乏等问题,聚焦重力侵蚀启动—发展—运移—堆积动力过程识别与模拟、重力侵蚀对流域水沙传输关系的作用效应等科学问题,提出重力侵蚀观测与识别新方法,构建流域重力侵蚀过程模拟模型,评估重力侵蚀与水土保持措施互馈效应及其对流域水沙输移的贡献,对于促进土壤侵蚀动力学发展,支撑黄河重大国家战略的实施具有重要意义。需要加强相关问题的研究:

1)以往对重力侵蚀的研究大多基于岩土力学理论,从力学角度进行分析,但黄土丘陵沟壑区的重力侵蚀确定性、不确定性交织,随机突发性强,是具有确定性变量和随机变量的耦合系统。为此,需要将重力侵蚀视为必然性—偶然性双过程耦合的随机动力过程,从动力过程与非线性随机过程耦合的角度加以分析,将黄土沟坡的稳定性表征为确定性函数与随机函数的耦合,形成基于动力过程与随机过程耦合的重力侵蚀产沙过程新思路,进而揭示重力侵蚀发生机制。

2)以往的重力侵蚀观测方法功能较为单一,大多是基于单过程、单参数观测,难以获取其发生发展过程。为此,需要采用集成创新思路,通过“天基—空基—地基”多技术融合,进行重力侵蚀“发育—启动—运移—堆积”全过程、多参数实时观测,并研发基于“AI+遥感”技术的多模态特征智能判识方法,实现重力侵蚀全过程捕捉、全要素观测、智能化提取的技术集成创新。

3)目前国内外在重力侵蚀观测识别、成因与经验评估等方面取得一定进展,但是针对重力侵蚀发生发展动力学机制及其过程模拟的研究仍然是突出的薄弱环节。因此,需要辨识重力侵蚀发生发展过程,深化多级沟道重力侵蚀—水沙产输过程模拟理论,构建流域重力侵蚀过程集成化模拟模型,为黄土高原精准治理和系统治理提供基础理论和方法支撑。

近年来,非线性动力复杂系统的建模理论和方法、人工智能算法的侵蚀特征快速识别等新理论、新技术的提出,成为目前国际侵蚀动力学理论、复

杂系统信息智慧化提取研究领域的生长点^[93-94],为重力侵蚀动力学过程深化、全过程观测与智能识别提供新的研究思路。因此,需要将重力侵蚀机理与模拟研究中亟需突破的关键问题和目前国际前沿研究中的生长点结合起来,通过动力学与随机理论融合、多尺度水沙传输与水文系统非线性理论结合、多元协同观测与人工智能算法交叉应用、多过程模块构建与服务化集成耦合。从理论上揭示重力侵蚀发生发展的动力过程和对水沙连通性的影响机制,从方法上突破重力侵蚀全过程多元一体观测与多模态特征智能提取,从模型上构建基于流域水沙过程视角的重力侵蚀集成化模拟模型,全面提升黄土高原重力侵蚀模拟与评估水平。

参考文献:

- [1] 王光谦,薛海,李铁键.黄土高原沟坡重力侵蚀的理论模型[J].应用基础与工程科学学报,2005,13(4):335-344.
WANG G Q, XUE H, LI T J. Mechanical model for gravitational erosion in gully area [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(4): 335-344.
- [2] 黄河水利委员会.黄河流域水土保持公报(2020年)[R].郑州:黄河水利委员会,2022.
YELLOW RIVER CONSERVANCY COMMISSION. Bulletin of soil and water conservation in the Yellow River Basin (2020) [R]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Commission, 2022.
- [3] 刘希林,张大林.基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J].农业工程学报,2015,31(4):204-211.
LIU X L, ZHANG D L. Temporal-spatial analyses of collapsed gully erosion based on three-dimensional laser scanning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 204-211.
- [4] 姚文艺.新时代黄河流域水土保持发展机遇与科学定位[J].人民黄河,2019,41(12):1-7.
YAO W Y. Development opportunity and scientific positioning of soil and water conservation of the Yellow River in the new era [J]. Yellow River, 2019, 41(12): 1-7.
- [5] XU X Z, LIU Z Y, XIAO P Q, et al. Gravity erosion on the steep loess slope: Behavior, trigger and sensitivity [J]. Catena, 2015, 135: 231-239.
- [6] 焦菊英,王志杰,魏艳红,等.延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J].农业工程学报,2017,33(13):159-167.
JIAO J Y, WANG Z J, WEI Y H, et al. Characteristics of erosion sediment yield with extreme rainstorms in Yanhe watershed based on field measurement [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13): 159-167.
- [7] 刘宝元,姚文艺,刘国彬,等.无定河流域“7·26”特大暴雨水土保持综合考察报告[R].陕西杨凌:中国科学院水利部水土保持研究所,2017:40-65.
LIU B Y, YAO W Y, LIU G B, et al. Comprehensive investigation report on soil and water conservation of the “7·26” extreme rainstorm in the Wuding River basin [R]. Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 2017: 40-65.
- [8] 张茜茜,龚家国,王浩,等.黄土区重力侵蚀研究进展与展望[J].水利水电技术(中英文),2022,53(12):172-184.
ZHANG Q Q, GONG J G, WANG H, et al. Study on progress and prospect of gravity erosion in loess region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(12): 172-184.
- [9] KARIMINEJAD N, HOSSEINALIZADEH M, POURGHASEMI H R, et al. Change detection in piping, gully head forms, and mechanisms [J]. Catena, 2021, 206: e105550.
- [10] 杨吉山,姚文艺,郑明国,等.岔巴沟淤地坝小流域重力侵蚀产沙量分析[J].水利学报,2017,48(2):241-245.
YANG J S, YAO W Y, ZHENG M G, et al. Analysis on gravitational sediment yield in the check-dam controlled basins of Chabagou watershed [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(2): 241-245.
- [11] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
TANG K L. Soil and water conservation in China [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [12] 王德甫,赵学英,马浩禄,等.黄土重力侵蚀及其遥感调查[J].中国水土保持,1993(12):25-28.
WANG D F, ZHAO X Y, MA H L, et al. Gravity erosion of loess and its remote sensing investigation [J]. Soil and Water Conservation in China, 1993(12): 25-28.
- [13] 杨子生.云南金沙江流域重力侵蚀量分析[J].水土保持学报,2002,16(6):4-8.
YANG Z S. Analysis on amount of gravitational erosion in Jinsha River basin of Yunnan Province [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16(6): 4-8.
- [14] 李容全,方修琦,邹铭.黄河演变与水土流失区域扩散模式的关系[J].北京师范大学学报(自然科学版),1990,26(1):76-83.
LI R Q, FANG X Q, ZOU M. Research on the relationship between the evolution of the Yellow River and the regional diffuse mode of erosion [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 1990, 26(1): 76-83.

- jing Normal University (Natural Science), 1990, 26 (1): 76-83.
- [15] 叶浩, 石建省, 程彦培, 等. '劈'砂岩重力侵蚀定量计算的 GPS、GIS 方法初探[J]. 地球学报, 2004, 25(4): 479-482.
- YE H, SHI J S, CHENG Y P, et al. A new method based on GPS and GIS for quantitative assessment of gravity erosion in pi-sandstone area[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(4): 479-482.
- [16] 刘希林, 张大林. 崩岗地貌侵蚀过程三维立体监测研究: 以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 26-31.
- LIU X L, ZHANG D L. Study on erosion process of collapsing hill and gully by three-dimensional monitoring: An example of Liantanggang in Wuhua County of Guangdong Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 26-31.
- [17] MA Y L, XU X Z, XIAO P Q, et al. Geomorphic natural hazard on loess terrain: Expansion on the gully sidewall [J]. Natural Hazards, 2021, 109(3): 2535-2555.
- [18] JIANG Y M, SHI H J, WEN Z M, et al. The dynamic process of slope rill erosion analyzed with a digital close range photogrammetry observation system under laboratory conditions [J]. Geomorphology, 2020, 350: e106893.
- [19] LI P F, LI D, HU J F, et al. Improving the application of UAV-LiDAR for erosion monitoring through accounting for uncertainty in DEM of difference [J]. Catena, 2024, 234: e107534.
- [20] ZHU Y, LIU X J, ZHAO J, et al. Effect of DEM interpolation neighbourhood on terrain factors [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(1): e30.
- [21] KOU P L, XU Q, JIN Z, et al. Analyzing gully erosion and deposition patterns in loess tableland: Insights from small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS InSAR) [J]. Science of the Total Environment, 2024, 916: e169873.
- [22] 李朋飞, 王锦博, 张晓晨, 等. 基于三维地形扫描的坡沟系统侵蚀产沙监测方法对比[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 75-85.
- LI P F, WANG J B, ZHANG X C, et al. Comparison of erosion monitoring algorithms used for slope-gully system based on 3D laser scanning [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 75-85.
- [23] DAI W, QIAN W, LIU A L, et al. Monitoring and modeling sediment transport in space in small loess catchments using UAV-SfM photogrammetry [J]. Catena, 2022, 214: e106244.
- [24] 张凡, 李华山, 江涛. 基于布模拟算法在 LiDAR 点云中生成数字高程模型[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 114-121.
- ZHANG F, LI H S, JIANG T. Digital elevation model generation in LiDAR point cloud based on cloth simulation algorithm [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 114-121.
- [25] GOODWIN N R, ARMSTON J D, MUIR J, et al. Monitoring gully change: A comparison of airborne and terrestrial laser scanning using a case study from Aratula, Queensland [J]. Geomorphology, 2017, 282: 195-208.
- [26] METES M J, MILLER A J, BAKER M E, et al. Remotely mapping gullying and incision in Maryland Piedmont headwater streams using repeat airborne lidar [J]. Geomorphology, 2024, 455: e109205.
- [27] NOTO L V, BASTOLA S, DIALYNAS Y G, et al. Integration of fuzzy logic and image analysis for the detection of gullies in the Calhoun Critical Zone Observatory using airborne LiDAR data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 126: 209-224.
- [28] BENJAMIN J, ROSSER N J, BRAIN M J. Rockfall detection and volumetric characterisation using LiDAR [M]//Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice. Boca Raton: CRC Press, 2018: 389-395.
- [29] YOUSSEF A M, MAHDI A M, AL-KATHERI M M, et al. Multi-hazards (landslides, floods, and gully erosion) modeling and mapping using machine learning algorithms [J]. Journal of African Earth Sciences, 2023, 197: e104788.
- [30] SETARGIE T A, TSUNEKAWA A, HAREGEWEYN N, et al. Random Forest-based gully erosion susceptibility assessment across different agro-ecologies of the Upper Blue Nile basin, Ethiopia [J]. Geomorphology, 2023, 431: e108671.
- [31] SHELHAMER E, LONG J, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(4): 640-651.
- [32] ZHAO H Q, FANG X, DING H, et al. Extraction of terraces on the Loess Plateau from high-resolution DEMs and imagery utilizing object-based image analysis [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(6): e157.
- [33] XU C, DU X P, FAN X T, et al. Cloud-based storage and computing for remote sensing big data: A tech-

- nical review [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 1417-1445.
- [34] GAO H, XU X Z, ZHANG H W, et al. How effective is vegetation in reducing gravity erosion on loess gully sidewall under intense rainfalls? [J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31(17): 2605-2619.
- [35] WU H W, GUO B, XUE H R, et al. What are the dominant influencing factors on the soil erosion evolution process in the Yellow River basin? [J]. *Earth Science Informatics*, 2021, 14(4): 1899-1915.
- [36] CHEN Y X, JIAO J Y, YAN X Q, et al. Response of gully morphology and density to the spatial and rainy-season monthly variation of rainfall at the regional scale of the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 2024, 236: e107773.
- [37] 杨吉山, 姚文艺, 马三保, 等. 黄土高原沟壑区小型重力侵蚀影响因素分析 [J]. *水土保持研究*, 2010, 17(6): 5-8.
- YANG J S, YAO W Y, MA S B, et al. Analysis on the small gravitational erosion factors in gully region of the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(6): 5-8.
- [38] QIN M Y, CUI P, JIANG Y, et al. Occurrence of shallow landslides triggered by increased hydraulic conductivity due to tree roots [J]. *Landslides*, 2022, 19(11): 2593-2604.
- [39] BABAZADEH H, ASHOURIAN M, SHAFI-BAJESTAN M. Experimental study of headcut erosion in cohesive soils under different consolidation types and hydraulic parameters [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(12): e438.
- [40] CHEN A Q, ZHANG D, PENG H, et al. Experimental study on the development of collapse of overhanging layers of gully in Yuanmou valley, China [J]. *Catena*, 2013, 109: 177-185.
- [41] LIU X, GUO M M, ZHANG X Y, et al. Morphological characteristics and volume estimation model of permanent gullies and topographic threshold of gully in the rolling hilly Mollisols region of northeast China [J]. *Catena*, 2023, 231: e107323.
- [42] JIANG X D, HOU T S, GUO S L, et al. Influence of cracks on loess collapse under heavy rainfall [J]. *Catena*, 2023, 223: e106959.
- [43] DUAN X, HOU T S, JIANG X D. Study on stability of exit slope of Chenjiapo tunnel under extreme rain-storm conditions [J]. *Natural Hazards*, 2021, 107(2): 1387-1411.
- [44] ZHANG H W, LIU G Q, ZHAO C S, et al. Loess erosion change modeling during heavy rainfall [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2023, 38(1): 24-32.
- [45] 金钊, 彭建兵, 庄建琦, 等. 黄土塬沟道侵蚀扩张机理与固沟保塬工程的科学性 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(4): 806-822.
- JIN Z, PENG J B, ZHUANG J Q, et al. Gully erosion and expansion mechanisms in loess tablelands and the scientific basis of gully consolidation and tableland protection [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2023, 53(4): 806-822.
- [46] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究 [J]. *工程地质学报*, 2011, 19(4): 530-540.
- ZHANG M S, LI T L. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(4): 530-540.
- [47] 史倩华, 王文龙, 郭明明, 等. 董志塬沟头溯源侵蚀过程及崩塌中孔隙水压力变化 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 110-117.
- SHI Q H, WANG W L, GUO M M, et al. Headcut erosion processes and pore water pressure variation on Dongzhi tableland of China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(18): 110-117.
- [48] 李铁键, 王光谦, 张成, 等. 黄土沟壑区流域重力侵蚀模拟 [J]. *天津大学学报*, 2008, 41(9): 1136-1141.
- LI T J, WANG G Q, ZHANG C, et al. Simulation of gravitational erosion in river basins on Loess Plateau [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(9): 1136-1141.
- [49] LI L, WANG Y, CAO Z J. Probabilistic slope stability analysis by risk aggregation [J]. *Engineering Geology*, 2014, 176: 57-65.
- [50] 严华, 郭晓军, 葛永刚, 等. 泥石流沟岸堆积体侧蚀破坏的随机性 [J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(6): 85-97.
- YAN H, GUO X J, GE Y G, et al. The randomness of lateral erosion failure of debris flow gully deposits [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(6): 85-97.
- [51] LI Z, LIU W Z, ZHANG X C, et al. Assessing the site-specific impacts of climate change on hydrology, soil erosion and crop yields in the Loess Plateau of China [J]. *Climatic Change*, 2011, 105(1): 223-242.
- [52] ZHANG X C, LIU W Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(3/4): 127-142.
- [53] 蔡强国, 刘纪根, 郑明国. 黄土丘陵沟壑区中大流域侵蚀产沙模型与尺度转换研究 [J]. *水土保持通报*, 2007, 27(4): 131-135.
- CAI Q G, LIU J G, ZHENG M G. Sediment yield model and upscaling for medium and large watersheds in

- hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(4): 131-135.
- [54] 汤立群, 陈国祥. 小流域产流产沙动力学模型[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1997, 12(2): 164-174.
TANG L Q, CHEN G X. A dynamic model of runoff and sediment yield from small watershed[J]. Journal of Hydrodynamics, 1997, 12(2): 164-174.
- [55] 郭文召, 刘亚坤, 徐向舟, 等. 可变模糊识别方法在滑坡稳定性评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 176-182.
GUO W Z, LIU Y K, XU X Z, et al. Application of variable fuzzy pattern recognition method on landslide stability assessment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 176-182.
- [56] PANDEY A, HIMANSHU S K, MISHRA S K, et al. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited[J]. Catena, 2016, 147: 595-620.
- [57] 金鑫, 刘喆, 王春振, 等. 人工黄土坡面重力侵蚀数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2020(8): 40-45.
JIN X, LIU Z, WANG C Z, et al. Numerical simulation of gravity erosion on artificial loess slope[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(8): 40-45.
- [58] ZHAO L H, LIU X N, MAO J, et al. Three-dimensional distance potential discrete element method for the numerical simulation of landslides[J]. Landslides, 2020, 17(2): 361-377.
- [59] LI W C, DENG G, CAO W, et al. Discrete element modeling of the Hongshiyuan landslide triggered by the 2014 Ms 6.5 Ludian earthquake in Yunnan, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(16): e520.
- [60] WU S B, CHEN L, WANG N L, et al. Variable power-law scaling of hillslope Hortonian rainfall-runoff processes [J]. Hydrological Processes, 2019, 33(22): 2926-2938.
- [61] 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2061-2067.
NI J P, WEI C F, XIE D T. Effects of spatial scale on the quantitative estimation of soil erosion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2061-2067.
- [62] 张攀, 唐洪武, 姚文艺, 等. 细沟形态演变对坡面水沙过程的影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 535-541.
ZHANG P, TANG H W, YAO W Y, et al. Rill morphology evolution and runoff and sediment yielding processes [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 535-541.
- [63] GÓMEZ J A, NEARING M A, GIRÁLDEZ J V, et al. Analysis of sources of variability of runoff volume in a 40 plot experiment using a numerical model[J]. Journal of Hydrology, 2001, 248(1/2/3/4): 183-197.
- [64] NEARING M A, GOVERS G, NORTON L D. Variability in soil erosion data from replicated plots[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(6): 1829-1835.
- [65] 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.
ZHANG P, YAO W Y, TANG H W, et al. Rill morphology change and its effect on erosion and sediment yield on loess slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 114-119.
- [66] BARTLEY R, SPEIRS W J, ELLIS T W, et al. A review of sediment and nutrient concentration data from Australia for use in catchment water quality models[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 65(4/5/6/7/8/9): 101-116.
- [67] LI T J, WANG G Q, XUE H, et al. Soil erosion and sediment transport in the gullied Loess Plateau: Scale effects and their mechanisms[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(5): 1283-1292.
- [68] VALENTIN C, POESEN J, LI Y. Gully erosion: Impacts, factors and control [J]. Catena, 2005, 63(2/3): 132-153.
- [69] 潘雅文, 马文龙, 潘庆宾, 等. 流域侵蚀输沙空间尺度效应及其影响因素研究进展[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 88-97.
PAN Y W, MA W L, PAN Q B, et al. Review of the scale effects of soil erosion and sediment delivery and their influencing factors [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 88-97.
- [70] 张光辉. 从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 295-308.
ZHANG G H. Understanding sediment connectivity from soil erosion perspective [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 295-308.
- [71] LIU H, GONG P, WANG J, et al. Production of global daily seamless data cubes and quantification of global land cover change from 1985 to 2020-iMap World 1.0 [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 258: e112364.
- [72] BAUMANN P. On the analysis-readiness of spatio-temporal earth data and suggestions for its enhancement [J]. Environmental Modelling and Software, 2024, 176: e106017.
- [73] MAHECHA M D, GANS F, BRANDT G, et al. Earth system data cubes unravel global multivariate dynamics [J]. Earth System Dynamics, 2020, 11(1):

- 201-234.
- [74] GOMES V C F, QUEIROZ G R, FERREIRA K R, et al. Brazil data cube workflow engine: A tool for big earth observation data processing [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2024, 17(1): 62-73.
- [75] BORRELLI P, ALEWELL C, ALVAREZ P, et al. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: e146494.
- [76] KHALEGHPANAH N, SHORAF A M, ASADI H, et al. Modeling soil loss at plot scale with EUROSEM and RUSLE2 at stony soils of Khamesan watershed, Iran [J]. *Catena*, 2016, 147: 773-788.
- [77] ROSAS M A, GUTIERREZ R R. Assessing soil erosion risk at national scale in developing countries: The technical challenges, a proposed methodology, and a case history [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: e135474.
- [78] 李文杰, 王兴奎, 李丹勋, 等. 基于物理过程的分布式流域水沙预报模型 [J]. *水利学报*, 2012, 43(3): 264-274.
- LI W J, WANG X K, LI D X, et al. A physically-based distributed watershed water erosion prediction model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(3): 264-274.
- [79] YU J, ZHANG Z S, SARWAT M. Spatial data management in apache spark: The GeoSpark perspective and beyond [J]. *GeoInformatica*, 2019, 23(1): 37-78.
- [80] ALARABI L, MOKBEL M F, MUSLEH M. ST-Hadoop: A MapReduce framework for spatio-temporal data [J]. *GeoInformatica*, 2018, 22(4): 785-813.
- [81] KONG W J, WANG T J, LIU L L, et al. A novel design and application of spatial data management platform for natural resources [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 411: e137183.
- [82] XU J W, UEDA K, UZUOKA R. Evaluation of failure of slopes with shaking-induced cracks in response to rainfall [J]. *Landslides*, 2022, 19(1): 119-136.
- [83] 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: e102898.
- [84] 汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展 [J]. *地理学报*, 2014, 69(9): 1305-1325.
- TANG G A. Progress of DEM and digital terrain analysis in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1305-1325.
- [85] KHOSRAVI K, REZAIE F, COOPER J R, et al. Soil water erosion susceptibility assessment using deep learning algorithms [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 618: e129229.
- [86] ANGILERI S E, CONOSCENTI C, HOCHSCHILD V, et al. Water erosion susceptibility mapping by applying Stochastic Gradient Treeboost to the Imera Meridionale River basin (Sicily, Italy) [J]. *Geomorphology*, 2016, 262: 61-76.
- [87] GAROSI Y, SHEKLABADI M, CONOSCENTI C, et al. Assessing the performance of GIS-based machine learning models with different accuracy measures for determining susceptibility to gully erosion [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 1117-1132.
- [88] GHOLAMI V, SAHOUR H, ALI HADIAN AMRI M. Soil erosion modeling using erosion pins and artificial neural networks [J]. *Catena*, 2021, 196: e104902.
- [89] SAEEDIMOGHADDAM M, NEARING G, GOODRICH D C, et al. An artificial neural network to estimate the foliar and ground cover input variables of the Rangeland Hydrology and Erosion Model [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 631: e130835.
- [90] GALLUP E, GALLUP T, POWELL K. Physics-guided neural networks with engineering domain knowledge for hybrid process modeling [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2023, 170: e108111.
- [91] NEARING G, COHEN D, DUBE V, et al. Global prediction of extreme floods in ungauged watersheds [J]. *Nature*, 2024, 627(8004): 559-563.
- [92] 姚文艺. 土壤侵蚀模型及工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- YAO W Y. Soil erosion model and its engineering application [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [93] WINIWARTER L, ANDERS K, HÖFLE B. M3C2-EP: Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 178: 240-258.
- [94] 何永红, 靳鹏伟, 舒敏. 基于多尺度相关性分析的 InSAR 对流层延迟误差改正算法 [J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(9): 1878-1886.
- HE Y H, JIN P W, SHU M. InSAR tropospheric delay error correction algorithm based on multi-scale correlation analysis [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(9): 1878-1886.