

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.042; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.042.

张攀, 韩志刚, 王靖淑, 等. 黄土高原土壤侵蚀模型现状、问题及对策研究[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 1-10.

Zhang Pan, Han Zhigang, Wang Jingshu, et al. Research on current situation, problems, and countermeasures of soil erosion models on Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1): 1-10.

黄土高原土壤侵蚀模型现状、问题及对策研究

张攀^{1,2}, 韩志刚³, 王靖淑^{1,2}, 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, 开封 475000)

摘要: [目的] 系统梳理黄土高原土壤侵蚀模型的研究进展, 提出模型研发中需要重点解决的若干关键科学问题, 以及相应的对策措施, 以期开展黄土高原土壤侵蚀过程模拟与预测研究及数字孪生黄河建设提供参考。[方法] 综述了土壤侵蚀模型的发展概况、水土保持措施信息提取及定量表征、流域多时空尺度土壤侵蚀过程、多时空尺度土壤侵蚀模型集成耦合等若干方面的研究进展, 分析了研究中存在的水土保持措施智能提取及参数化、模型的多时空尺度转换、流域水沙级联传输关系、基于数字孪生流域的土壤侵蚀预测预报服务平台构建等突出问题。[结果] 目前, 国内外土壤侵蚀模型难以准确刻画黄土高原坡沟系统复杂的地貌特点, 缺乏水土保持措施对水沙过程的调控作用的模拟, 尚不能满足数字孪生黄河建设对水土流失预测预报的科技需求。[结论] 提出今后需要加强重力侵蚀动力作用与随机过程的耦合机制研究, 研发水土保持措施高频快速多目标识别与高精度智能提取方法, 揭示土壤侵蚀随流域尺度复杂变化的转换关系, 构建基于数字孪生流域的坡面侵蚀、沟道重力侵蚀和水土保持措施调控作用集成化预报模型。

关键词: 土壤侵蚀; 预测预报; 数学模型; 黄土高原; 数字孪生黄河

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0001-10

Research on current situation, problems, and countermeasures of soil erosion models on Loess Plateau

Zhang Pan^{1,2}, Han Zhigang³, Wang Jingshu^{1,2}, Zhang Yufei^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China;

2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003,

China; 3. School of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng, Henan 475000, China)

Abstract: [Objective] This study systematically reviews the research progress of soil erosion models on the Loess Plateau, identifies several key scientific issues that need to be addressed in model development, and proposes corresponding countermeasures, aiming to provide references for simulating and predicting soil erosion processes in the Loess Plateau and the construction of the digital twin of the Yellow River. [Methods] The research progress is reviewed in several aspects, including the development of soil erosion models, information extraction and quantitative characterization of soil and water conservation measures, multi-spatiotemporal scale soil erosion processes within watersheds, and the integration and coupling of multi-spatiotemporal scale soil erosion models. Key challenges are analyzed, such as the intelligent extraction and parameterization of soil and water conservation measures, multi-spatiotemporal scale transformation of models, cascade transport relationships of water and sediment within watersheds, and the construction of soil erosion prediction and forecasting service platforms based on digital twin watersheds. [Results] Currently, both domestic and international soil erosion models struggle to accurately represent the complex geomorphological characteristics of

收稿日期: 2025-03-06

修回日期: 2025-04-09

接受日期: 2025-06-01

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

第一作者: 张攀(1982—), 女, 河南洛阳人, 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://stbcyj.paperonice.org>

the slope-gully systems on the Loess Plateau. They lack simulations of the regulatory effects of soil and water conservation measures on water-sediment processes and thus cannot meet the scientific and technological requirements for soil erosion prediction and forecasting in the construction of the digital twin of the Yellow River. [Conclusion] This study proposes to strengthen future research on the coupling mechanisms between gravitational erosion dynamics and stochastic processes, develop high-frequency, rapid, multi-objective identification and high-precision intelligent extraction methods for soil and water conservation measures, reveal the transformation relationships of soil erosion under complex variations across watershed scales, and construct an integrated forecasting model that incorporates slope erosion, gully gravitational erosion, and the regulatory effects of soil and water conservation measures based on digital twin watersheds.

Keywords: soil erosion; prediction and forecasting; mathematical model; Loess Plateau; digital twin of Yellow River

黄土高原是我国水土流失最为严重的区域,也是我国“三区四带”生态安全战略格局的重要组成部分。近年来,黄土高原生态状况总体向好,但水土流失问题依然严重,据《黄河流域水土保持公报(2023年)》显示,黄土高原水土流失总面积约为 22.36 万 km^2 ,占黄河流域的 89.04%^[1],直接影响着黄河的防洪安全和生态安全^[2],长期制约区域经济社会可持续发展,给黄河生态安全屏障构筑和流域高质量发展带来了极大挑战^[3-4]。

黄土高原土壤侵蚀模型作为流域科学管理和治黄战略决策的重要手段,可为科学预测水土流失量、优化治理工程规划布局、评估水土保持蓄水减沙效益、分析入黄泥沙变化趋势提供精准支撑^[5],是智慧水土保持建设的核心内容,也是构建具有“预报、预警、预演、预案”功能的智慧水利体系的标志性工程^[6]。因此,研发黄土高原多时空尺度土壤侵蚀模型,提升黄土高原水土保持蓄水减沙作用的评价预测水平,对于推进新阶段水利高质量发展和智慧水利建设,支撑黄河流域生态保护和高质量发展国家战略具有重要的科学价值和应用前景。

黄土高原坡陡沟深、侵蚀环境复杂,坡度大于 25°的面积占到 50% 以上,沟谷坡和沟谷底的侵蚀受水力和重力双重作用,崩塌、泻溜等重力侵蚀是流域泥沙的主要来源^[7-8]。20 世纪 50 年代以来,国家在黄土高原地区开展了大规模水流失综合治理,水土保持措施配置格局的变化改变了流域下垫面条件和微地貌,从而影响到侵蚀产沙过程^[9-10],对沟道重力侵蚀的调控作用影响深刻。因此,从机理上深化对沟道重力侵蚀的认识,从方法上突破水土保持措施的参数化模拟,从平台上集成构建沟道重力侵蚀产沙和水土保持措施影响作用的土壤侵蚀过程精准预报模型,全面提升黄土高原水土流失模拟与预测水平,是牵系黄河流域生态屏障安全的关键问题。为此,本文回顾了近 70

年来黄土高原土壤侵蚀模型的发展概况、水土保持措施信息提取及定量表征、流域多时空尺度土壤侵蚀过程、多时空尺度土壤侵蚀模型集成耦合等方面的研究进展,分析水土保持措施智能提取及参数化、模型的多时空尺度转换、流域水沙级联传输关系、土壤侵蚀预测预报服务平台构建等方面存在的问题,并进一步展望未来该区域土壤侵蚀模型研究中的相关内容,力求为保障黄河流域生态安全提供理论支撑。

1 国内外研究现状及进展分析

1.1 土壤侵蚀模型的发展概况

土壤侵蚀模型研究一直是土壤和地理学科的前沿领域,也是国内外学者关注的焦点^[11-14]。我国的黄土高原土壤侵蚀模型研究起步于 20 世纪 50 年代,这一时期刘善建、席承藩、罗来兴等学者结合黄河水利委员会天水、绥德、西峰等水土保持科学试验站的观测资料,以建立坡面土壤侵蚀经验模型为主^[15]。20 世纪 80 年代,经验模型和机理模型显著发展,大量国外研发的土壤侵蚀模型被用于研究黄土高原的水土流失过程,如 USLE 及其修订版本 RUSLE、WEPP、LISEM、SWAT 等^[16-20],但由于黄土高原陡坡侵蚀比欧美单一的缓坡水蚀要复杂得多^[21-22],移植国外模型时未对控制方程的结构及计算方法进行实质性修改,导致国外土壤侵蚀模型在该地区的应用出现了诸多“水土不服”问题^[23]。20 世纪 90 年代,刘宝元等^[24]在考虑我国土壤状况和侵蚀特征的基础上,对 USLE 模型进行了改进,建立了更加适合我国土壤侵蚀特点的 CSLE 模型。随着地理信息系统的引入和计算机技术的发展,基于 3S 技术的分布式流域产沙机理模型逐渐发展起来^[25-26],特别是在“数字黄河”工程建设推动下^[27],建立了黄河多沙粗沙区分布式小流域土壤侵蚀评价预测物理成因模型,实现了土壤侵蚀模型与 GIS 的紧密耦合^[28]。进入 21 世纪,随着人工智能技术

的快速发展,元胞自动机(Cellular Automata, CA)与人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)被广泛应用于土壤侵蚀预报中,但由于该模型自身的特点,很难考虑流域内空间变化对产沙的影响^[29-30]。21世纪初,数字流域理论和技术在水利信息化的推动下逐步深化拓展,王光谦等^[31]研发了适用于次暴雨过程的黄河数字流域模型DYRIM,将细沟侵蚀和细沟间侵蚀过程概化成坡面流侵蚀,实现了流域水沙全物理过程模拟。近年来,随着传感技术、物联网、大数据与虚拟仿真技术的兴起,数字孪生技术以其数字化映射、智慧化模拟,可在虚拟空间中构建数字模型与物理实体相交互的全生命周期仿真模型,为构建基于数字孪生流域的土壤侵蚀模型提供了新思路(图1)。

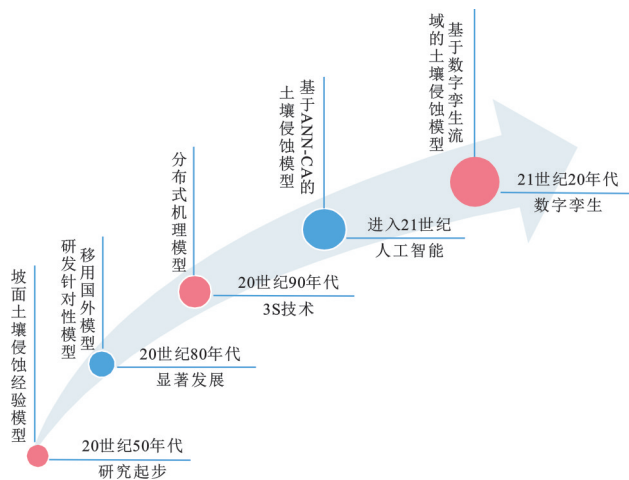


图1 黄土高原土壤侵蚀模型发展过程

Fig. 1 Development process of soil erosion models on Loess Plateau

黄土高原地区重力侵蚀严重,重力侵蚀产沙是流域泥沙的重要来源^[32-34]。黄河水利委员会西峰、天水、绥德3个水保站在南小河沟、吕二沟、韭园沟的调查表明,重力侵蚀分别占3个典型小流域土壤流失量的比例可达57.5%,68.0%和20.2%^[35]。蒋德麒等^[36]对黄土高原典型小流域分析后认为,在黄土丘陵沟壑区,重力侵蚀占流域侵蚀产沙的20%~25%,在黄土高原沟壑区占58%左右。韩鹏等^[37]进行的室内试验也表明,在沟坡的发育过程中,重力侵蚀量占总侵蚀产沙量的50%以上。黄土沟道重力侵蚀以滑塌、崩塌和泻溜为主要类型,其中滑塌、崩塌占70%左右,泻溜占近30%^[38]。虽然重力侵蚀在流域侵蚀产沙中占有相当大的比例,但由于缺乏足够的观测资料,且其发生具有随机性和突发性,成为制约黄土高原土壤侵蚀数学模型发展的重要因素^[39]。国外影响最大的通用土壤流失方程(Universal Soil Loss Equation, USLE)及修正的土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)主要适用于缓坡地形,并没有把

重力侵蚀作为重要的影响因素^[40]。国内不少学者在建立黄土高原地区土壤侵蚀方程时虽然也考虑了重力侵蚀的因素,但由于基础研究的不足,大多是经验性的^[41],限制了对这一问题的解决,因此,对重力侵蚀机理的研究是建立黄土高原物理成因产沙模型的必然需求。

1.2 水土保持措施信息提取及定量表征

对水土保持措施信息的精确提取是提升土壤侵蚀模型模拟精度的算据支撑。黄土高原大量实施的水土保持措施通过减缓坡度、截短坡长、增加地表糙率、抬高侵蚀基准面、改变地表形态等,深刻改变着流域下垫面的产汇流和产输沙条件^[42]。水土保持措施信息提取经历了从传统费时费力的人工解译,到面向对象的半自动或全自动计算机解译^[43],逐渐步入到基于深度学习等人工智能技术的智能解译阶段^[44-45]。

植被覆盖因子是土壤流失方程众多影响因子中变化幅度较大的因子,估算植被覆盖度的方法主要为地面实测调查和遥感技术应用,在下垫面复杂的黄土高原地区,遥感技术的优势更加突出^[46]。目前,表征植被生长状况的指数主要有EVI、DVI、FVC和NDVI等^[47-48],其中,在黄土高原地区侵蚀模拟研究中大多采用归一化植被指数NDVI、归一化红边指数NREI、比值植被指数RVI、植被纹理特征等表征水土保持措施的植被因子。通过回归模型法、混合像元分解法和机器学习法等遥感反演植被覆盖度,表征指标也从简单的覆盖度、面积,发展到植被结构、生物量等^[49]。

淤地坝具有显著的拦泥、减蚀、减洪等综合水沙调控效应。据《2021年黄河流域水土保持公报》显示,黄土高原地区现有淤地坝达5.7万座。目前对淤地坝的提取多集中于利用野外调查、地形图、目视解译、无人机航摄获取坝体位置、数目、淤积面积、控制面积等参数^[50],由于淤地坝在遥感影像中纹理特征不明显,在解译过程中难以与部分自然堆土、田坎区分,受限于遥感影像分辨率及解译技术,其智能提取难度较大^[51]。

梯田措施由于减缓地面坡度、缩短坡长、减弱径流侵蚀能力,从而具有良好的蓄水保土保肥、阻控侵蚀等功能^[52]。对流域梯田的测量主要依据影像的光谱、纹理、形态特征等,对梯田田面、田坎、边缘线等进行综合判定,并采用位置、梯田占流域面积的比例、长(宽)度、埂坎高度和坡度等一系列几何参数进行定量表征^[53]。在使用中国土壤流失方程CSLE模型计算时,通过查梯田水土保持工程措施因子赋值表,来获取梯田措施因子值;也有学者将梯田模块引入SWAT模型,进行梯田水沙及养分流失模拟,将梯田修建后的坡面重新分割为切坡段、平坡段和隔坡

段 3 种坡段,对梯田结构进行数学描述。但由于单块梯田宽度大多不足 20 m,受影像质量、信息处理手段等因素制约,提取效果并不理想^[54]。

近年来,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,使得遥感影像水土保持措施快速精准提取成为可能。基于像元提取技术、面向对象分类技术、基于纹理特征的傅里叶变换算法、模板匹配算法等方法的应用,进一步提高了水土保持工程措施信息提取的精度和可靠性^[55]。深度学习语义分割模型更加注重地物图斑在待分类影像中的位置、边界、面积等信息,因此更加适用于水土保持措施图斑的提取,目前主流的语义分割模型有 DeepLab、FCN、UNet、PSPNet 等。但在遥感分类提取中运用深度学习起步较晚,目前主要集中在特征显著的地物提取上,如工程措施中二级分类梯田和生物措施中二级分类造林、种草等,多依赖于高分辨率的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,对于多光谱信息尚有待发掘运用。

水土保持措施不是一个简单参数,在降雨—径流—泥沙物质迁移转换和驱动下,不同尺度“坡面—沟道—流域”侵蚀地貌单元相互作用、动态耦合,流域系统能耗过程的非线性特征非常突出。水土保持措施对流域水沙演变过程的影响程度不仅与各类措施的规模、质量相关,更与其空间配置的结构特征相关^[56]。在目前的土壤侵蚀模型中,对水土保持措施的定量表征多是以水蚀产沙和经验赋值为重,缺少对水土保持措施结构功能科学量化的表达;对流域水土保持措施特征的研究主要集中于对单项措施类型保存量的统计,量化方法大多是针对单项水土保持措施的统计学方法;对流域尺度水土保持措施配置特征的研究仍以定性描述为主^[57],缺少对梯田、林草、淤地坝等多措施协同配置的结构功能定量表征方法,未能实现对水土保持措施的“仿真”参数化表达,难以满足黄土高原水土保持措施综合治理对水土流失影响的模拟。因此,需要将水土保持措施体系视为“类型—结构—功能”的动力调控系统,精准量测和识别水土保持措施的空间格局、结构类型、建设规模等,并进行科学量化表征,以具有力学意义的量化参数表征水土保持措施的结构功能,从系统论和水沙连通性的角度,揭示水土保持措施体系作用下多尺度地貌单元间的水沙级联传输关系,进而提升水土保持措施影响作用模拟与评估精度。

1.3 流域多时空尺度土壤侵蚀过程

土壤侵蚀的发生发展过程、时空分布、耦合关系等特性都是尺度依存的,具有时空尺度特征^[58]。土

壤侵蚀模型在空间尺度上可以划分为坡面、小流域和区域 3 个不同层次,随空间尺度变化,土壤侵蚀类型、过程和机理均表现出质的差异。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。随着空间尺度的增大,沉积过程开始占据主导地位,产沙模数逐渐变小。坡面尺度土壤侵蚀包括降雨击溅和径流冲刷引起的土壤颗粒分散、剥离、泥沙输移和沉积 4 个过程^[59],这个尺度上坡面流引起的细沟侵蚀和细沟间侵蚀是研究的重要内容。沟坡尺度侵蚀产沙过程涉及坡面侵蚀、沟道侵蚀以及坡沟侵蚀输沙与沉积过程的耦合^[60],坡沟切沟发育、溯源侵蚀、重力侵蚀和沟道侵蚀,以及坡面来水来沙对沟道系统的侵蚀演化过程是这个尺度研究的重点内容^[61-62]。流域尺度土壤侵蚀过程更具复杂性、非线性等特点,关注的重点则转变为空间分异性或地带性问题,要考虑由于空间变化所引起的侵蚀因子对侵蚀产沙响应的不同。

时间尺度影响着土壤侵蚀类型的发生发展过程,可分为次降雨、日、月、年尺度和多年平均尺度。次降雨过程与溅蚀、面蚀、细沟和浅沟的发育密切相关^[63],且因次降雨历时较短,土壤侵蚀产物发生滞留和堆积,泥沙输移比存在侵蚀与产沙暂时的不平衡。日尺度上,降雨、土壤、地形、植被等影响土壤侵蚀的要素会发生变化,更加关注降雨截留、土壤入渗、地表径流、泥沙输移等过程和机理,其过程伴随着细沟和浅沟向切沟过程的演化。月尺度上,关注降水的季节分配、植被的生长过程,水沙的变化过程。年或多年尺度上,更多地关注气候变化的侵蚀环境效应、土地利用变化、水沙演变趋势、水沙关系、泥沙输移比、人类活动的影响等^[64-65]。

随时空尺度变化,土壤侵蚀类型、影响因素、驱动机制各不相同。土壤流失量随时空尺度变化表现出非线性变化规律,侵蚀产沙过程主控因子的数量、耦合关系和主次排序地位随之发生改变^[66-67]。当尺度上移时,微观因子的控制作用有所减小,宏观因子的控制作用则逐渐凸显,比如降雨强度和洪峰流量等在描述次降雨过程时是主控因子,但在月、年或更长时间尺度上则会被降雨量和径流量所取代。坡度和坡长等是用于描述坡面的微观指标^[68],但在评价流域或区域尺度水土流失时会被平均坡度、沟壑密度、沟道比降等替代^[69]。嵌套流域随流域空间尺度增大,坡度、坡长、坡型等地形地貌的主导地位被取代,而降雨量和植被覆盖度的控制作用逐渐凸显。不同地区土壤侵蚀主导因素不同,但影响因素排序随空间尺度变化而易位的现象却是普遍存在的^[70]。

流域产流产沙过程并非不同地貌单元水沙过程的线性叠加,而是受到地质、地貌、气候、植被和人类活动等因素的综合影响。从坡面到流域,侵蚀方式与侵蚀过程的发展造成泥沙产生与输移特征的变化,随着流域面积的扩展,流域不同区位的作用逐渐从泥沙来源区过渡为泥沙输运和沉积区。在坡面尺度,泥沙主要产生于击溅侵蚀、细沟侵蚀和细沟间侵蚀,这些侵蚀方式的产沙量相对有限;当从坡面尺度扩展到流域尺度,由于沟道侵蚀和重力侵蚀的出现,泥沙产输能力大大增强,导致产沙量剧增^[71]。不同尺度上的主控因素也存在明显差异,坡面尺度($10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ km}^2$)的泥沙产输主要受土壤剥离、植被覆盖和地形等因素限制,子流域尺度($10^{-2} \sim 10 \text{ km}^2$)受沟道发育和泥沙输移沉积等因素限制,流域尺度($> 10 \text{ km}^2$)以局部强降雨分布、能量耗散和挟沙力为主要限制因素。流域水沙传输的尺度效应增加了不同尺度间侵蚀产沙模拟的复杂性,因此尺度转换是进行不同尺度间侵蚀产沙模拟的关键所在^[72]。

目前对土壤侵蚀的观测手段多为坡面小区和标准小区,仅在离散和单一尺度上进行,依据其观测结果建立的模型往往难以反映以坡面—沟道系统为地貌单元组成的流域尺度上的土壤侵蚀规律^[73],因此,土壤侵蚀产沙模型用于非常小的尺度模拟精度较高,但当模型用于描述大中尺度的侵蚀产沙过程时,不可避免地涉及侵蚀产沙的时空变异性^[74]。目前国内外有关流域侵蚀产沙与输移过程随流域尺度复杂变化的研究尚处于起步阶段,且多限于水文学的一些零星研究,难以满足设计和开发不同尺度土壤侵蚀数学模型的需要。

1.4 多时空尺度土壤侵蚀模型集成耦合

土壤侵蚀模型涉及降水、地形、土壤、植被等多因子的多源、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。时空立方体作为面向分析就绪处理范式中的核心方法,打破了传统模式技术瓶颈,基于高性能存储/计算设施,结合分析就绪型数据(Analysis Ready Data, ARD),采用统一的时空基准支持提供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了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^[74]、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,这一数据模型和处理范式为多尺度土壤侵蚀数据管理服务提供了新的集成方法。

土壤侵蚀预测预报以土壤侵蚀模型的高效计算为基本前提。目前,国内外学者在流域土壤侵蚀模型方面做了大量研究工作,设计开发了包括USLE、CSLE、WEPP、LISEM、RHEM、EU-ROSEM等在内的多个经验模型与机理模型^[76]。其中,经验模型不考虑土壤侵蚀过程的物理机制,主要从侵蚀影响因子出发,通过数理统计建立产流产沙与降雨、植被、土壤等因子间的多元回归关系。而机理模型首先将流域进行空间离散,生成二维栅格矩阵,并假定每一栅格单元的侵蚀因子参数均质化分布,通过将参数分配到空间网格上,进而计算每个网格上的侵蚀和沉积量,结合汇流演算计算流域出口处的水沙总量。为实现土壤侵蚀模型的高效计算,基于MapReduce计算模型开发了ST-Hadoop、GeoSpark、Sedona等时空大数据处理平台,这些平台在实现包括分布式土壤侵蚀在内的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。从模型耦合的角度,当前研究主要集中于土壤侵蚀模型与GIS功能的耦合,往往采用组件式GIS进行模型开发,在开展土壤侵蚀预测预报时也主要采用单一时空尺度,并且其计算涉及多源数据与多个计算子过程,缺少针对多时空尺度土壤侵蚀模拟服务平台,基于面向服务的计算架构开展土壤侵蚀模拟及预报服务仍需提升。

受益于计算机算力的不断提升与训练数据的不断丰富,机器学习方法近年来在多个领域取得了显著进展,当前已被成功应用于土壤侵蚀及相关领域。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,精度在0.87~0.92之间。将随机森林、支持向量机和朴素贝叶斯模型一起应用于预测流域冲沟侵蚀敏感性,发现随机森林模型的性能最优。此外,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,并在模拟过程中开展了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;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。例如,可采用湖泊水温动态模拟的GLM机理模型生成新特征,并将其输入神经网络进行水温预测,也可通过河流网络构建加权邻接矩阵,基于过程的流量预报模型用于生成无资料河段的训练样本,并利用观测数据定义额外偏置项,应用图卷积网络模型预测河流流量。多个研究案例显示出神经网络等机器学习方法在土壤侵蚀模型改进方面具备显著应用潜力。

近年来,随着物联网、大数据、人工智能与虚拟仿真技术的快速发展,数字孪生技术逐渐兴起,并应

用到了工业、城市、水利、交通等多个行业。自水利部部署推进数字孪生流域建设以来,数字孪生流域已成为水利信息化建设的热点。黄土高原土壤侵蚀预测预报作为黄河水利委员会《数字孪生黄河建设规划(2022~2025)》确定的重点任务之一,已被纳入到数字孪生黄河建设体系。从关键技术角度看,数字孪生流域是关于流域数字化的多技术集成应用。其中,物联网技术实现对物理流域的各项状态参数的全方位实时感知,时空大数据实现流域地理信息的快速采集建模与高效服务,模型模拟助力在数字空间刻画和推演流域水文侵蚀过程,虚拟仿真与可视化支撑流域实时状态与历史过程的精准表达。但目前的研究,在多时空尺度的土壤侵蚀模型耦合计算及其高效并行计算方面较为薄弱,缺少基于大数据分析的“调用—分析—预测—评估—展示”一体化集成平台,难以满足新时期黄土高原水土保持生态建设对土壤侵蚀预测预报的需求。

2 目前研究中存在的问题

综上所述,目前国内外在水土流失过程与模拟方法、水土保持措施信息提取技术、土壤侵蚀的尺度依存性、土壤侵蚀模型的高效计算方法等方面取得了一定进展,为黄土高原多时空尺度土壤侵蚀模型构建奠定了良好的理论基础,但是,仍存在以下突出问题:

(1) 目前国内外对水土保持措施信息智能提取技术方面开展了探索性研究。然而,提取精度和分析速度尚无法满足对水土流失预测预报的要求,且由于缺乏对水土保持措施空间格局、结构类型、建设规模的定量化和参数化表征方法,对水土保持措施调控流域水沙的影响作用仍是当前研究的薄弱环节,成为土壤侵蚀预报模型发展的重要瓶颈。因此,亟需结合多源高精度数据、机器学习方法与优化分割算法,研发植被、梯田、淤地坝等措施的遥感实时高频快速多目标识别与高精度智能提取技术,构建多元水土保持措施参数化表征方法,为提高土壤侵蚀模型的水土保持措施影响作用模拟与评估精度提供支撑。

(2) 在黄土高原地区,由于其侵蚀产沙过程具有强烈的时空分异性,解决其尺度转换问题更为重要。从目前已经建立的坡面、小流域和区域不同空间尺度上的土壤侵蚀预测模型来看,各空间尺度上指标的选择和模型的建立均是独立进行的,不同尺度的模型在模型结构、因子类型和方法形式上都具有很大差异,只能适用于对应空间尺度的土壤侵蚀评估和预测,不同尺度模型无法进行有效的信息交换。因此,不同尺度下土壤侵蚀影响因子之间的对应关

系以及如何进行尺度转化是土壤侵蚀研究中的一个难点问题,通过建立不同时空尺度土壤侵蚀产沙过程转换关系,利用小尺度上实用的土壤侵蚀预测模型和数据对大尺度水土流失进行定量预测与评价,具有重要的理论与实践意义。

(3) 流域水沙传输关系在时空上具有显著的不均匀性和变异性,尤其是大量实施的梯田、林草、淤地坝等水土保持措施改变了黄土高原流域下垫面的产汇流和产输沙条件,造成水沙的连通性受阻,水沙传输过程更加复杂。以往研究大多关注水土保持措施对土壤侵蚀的影响,而缺乏对“坡面—沟道—流域”多级地貌系统水沙级联传输关系的研究。因此,揭示水土保持措施阻控下的流域水沙级联传输关系,是制约坡面侵蚀、沟道重力侵蚀的土壤侵蚀预报模型高精度模拟的关键问题之一。

(4) 数字孪生流域在土壤侵蚀预测预报领域的研究与应用尚处于起步阶段,在数据集成、模型计算、预报服务方面仍以传统单机模式为主,在多时空尺度的土壤侵蚀模型耦合计算及其高效并行计算方面仍较为薄弱,基于分布式计算平台提供土壤侵蚀预测预报持续服务的研究尚不多见,难以满足新时期“数字孪生黄河”建设对土壤侵蚀预测预报的需求。因此,研究基于时空立方体的多时空尺度土壤侵蚀数据集成方法、多时空尺度土壤侵蚀模型耦合与并行计算方法,构建基于数字孪生流域的黄土高原多尺度土壤侵蚀预测预报服务平台,是“数字孪生黄河”建设亟待解决的关键问题。

3 对策及展望

进入新时期,黄河流域生态保护与高质量发展国家战略提出了“突出抓好黄土高原水土保持”的目标任务。2022年全国水利工作会议指出,要加快智慧水土保持建设,推进新阶段水利高质量发展。水利部印发的《推动黄河流域水土保持高质量发展的指导意见》《水土保持“十四五”实施方案》中明确提出要“研究构建黄土高原土壤侵蚀模型”“加快遥感影像自动识别等关键技术攻关,加快重点地区土壤侵蚀模型构建和优化”。因此,为适应新时期黄河治理开发与黄土高原水土保持生态建设的科技需求,需要深入研究黄土高原多时空尺度土壤侵蚀模型研发的科学瓶颈问题,这是践行黄土高原精准治理和系统治理,实现黄河国家战略目标和智慧水利建设的关键性基础支撑。

黄土高原土壤侵蚀具有沟道重力侵蚀动力随机过程耦合性强、多元水土保持措施调控作用交互叠加、多尺度地貌单元水沙级联传输关系复杂的显著特

征,而目前的土壤侵蚀模型对此并未实现精细模拟,成为水土保持措施影响作用模拟与评估精度提升的瓶颈。新时期“智慧水利”“数字孪生黄河”建设对土壤侵蚀预测预报提出了精准、高效的更高要求。因此,需要在以往重力侵蚀力学作用研究基础上,加强重力侵蚀动力作用与随机过程的耦合机制研究;在遥感识别水土保持措施基础上,研发水土保持措施高频快速多目标识别与高精度智能提取方法;在土壤侵蚀尺度依存性研究基础上,揭示土壤侵蚀随流域尺度复杂变化的转换关系;在现有土壤侵蚀模型基础上,嵌入沟坡重力侵蚀等关键模块进行耦合计算,并引入神经网络等机器学习方法改进水沙传输模拟与预报过程,构建基于数字孪生流域的坡面侵蚀、沟道重力侵蚀和水土保持措施调控作用集成化预报模型;在AI、大数据的基础上,构建大数据和土壤侵蚀物理过程相结合的数据—知识耦合模型,实现在复杂侵蚀边界条件下水土流失过程尺度转换与模拟预测上的理论创新,为黄土高原精准治理和系统治理,实现黄河国家战略目标提供基础支撑。

为此,今后的研究中需要针对黄土高原沟道重力侵蚀严重和水土保持措施调控作用影响深刻的突出问题,以解决制约黄土高原土壤侵蚀模型发展的重力侵蚀贡献、水保措施调控作用、多时空尺度转换核心理论问题为主线,交叉融合泥沙运动力学、侵蚀动力学、遥感科学与技术、地理信息系统和水土保持学等多学科多方法,利用野外重力侵蚀过程原位试验观测、土壤侵蚀实体比尺模型模拟试验、遥感信息智能提取和数字孪生视觉算法与分析等多种技术相结合,实现微观机理和内在规律的揭示与数学模拟功能的构建相结合,阐明黄土高原沟道重力侵蚀动力机制与产沙贡献,研发水土保持措施遥感高效高精量测分析及参数化模拟方法,建立土壤侵蚀产沙过程的多时空尺度转换关系,构建基于数字孪生流域的多时空尺度土壤侵蚀预报模型,实现坡面—沟道—小流域—区域不同时空尺度的土壤侵蚀模型嵌套与集成。研究结果将在复杂侵蚀边界条件下水土流失过程尺度转换与模拟预测的前沿领域取得新进展,为推进黄河流域生态治理和智慧水利建设提供坚实的理论支撑。

参考文献(References):

- [1] 黄委水保局.《黄河流域水土保持公报(2022年)》正式发布[J].水土保持应用技术,2024(1):72.
Water and Soil Conservation Bureau of Yellow River Conservancy Commission(YWRC). Bulletin on soil and water conservation in the Yellow River Basin(2022) was officially released[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2024(1):72.
- [2] 姚文艺,刘国彬.新时期黄河流域水土保持战略目标的转变与发展对策[J].水土保持通报,2020,40(5):333-340.
Yao W Y, Liu G B. Strategic goal change and development countermeasures of soil and water conservation in Yellow River Basin in new period[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(5):333-340.
- [3] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.
Hu C H, Zhang X M. Loess Plateau soil erosion governance and runoff-sediment variation of Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020,51(1):1-11.
- [4] 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.
- [5] 刘国彬,杨勤科,郑粉莉.黄土高原小流域治理与生态建设[J].中国水土保持科学,2004,2(1):11-15.
Liu G B, Yang Q K, Zheng F L. Small watershed management and eco-rehabilitation on the Loess Plateau of China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(1):11-15.
- [6] 郑粉莉,杨勤科,王占礼.水蚀预报模型研究[J].水土保持研究,2004,11(4):13-24.
Zheng F L, Yang Q K, Wang Z L. Water erosion prediction model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004,11(4):13-24.
- [7] 倪晋仁,李英奎.基于土地利用结构变化的水土流失动态评估[J].地理学报,2001,56(5):611-621.
Ni J R, Li Y K. Dynamic assessment for soil erosion based on land use-structure change[J]. Acta Geographica Sinica, 2001,56(5):611-621.
- [8] 姚文艺.我国侵蚀产沙数学模型研究评述与展望[J].泥沙研究,2011(2):65-74.
Yao W Y. Review and prospect of Chinese soil erosion and sediment yield mathematic models [J]. Journal of Sediment Research, 2011(2):65-74.
- [9] 蔡阳,成建国,曾焱,等.加快构建具有“四预”功能的智慧水利体系[J].中国水利,2021(20):1-5.
Cai Y, Cheng J G, Zeng Y, et al. Accelerate to build smart water system with the function of “forecast, early-warning, rehearsal and plan”[J]. China Water Resources, 2021(20):2-5.
- [10] Xu X Z, Zhang H W, Wang G Q, et al. An experimental method to verify soil conservation by check dams on the Loess Plateau, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009,159(1):293-309.
- [11] 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.
- [12] 秦伟, 曹文洪, 郭乾坤, 等. 植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J]. *生态学报*, 2017, 37(14):4905-4912.
Qin W, Cao W H, Guo Q K, et al. Review of the effects of vegetation patterns on soil erosion and sediment yield [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(14):4905-4912.
- [13] 刘晓燕, 杨胜天, 王富贵, 等. 黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析[J]. *水利学报*, 2014, 45(11):1293-1300.
Liu X Y, Yang S T, Wang F G, et al. Analysis on sediment yield reduced by current terrace and shrubs-herbs-*Arbor* vegetation in the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(11):1293-1300.
- [14] 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.
- [15] Borrelli P, Alewell C, Alvarez P, et al. Soil erosion modelling: a global review and statistical analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780:146494.
- [16] 蔡强国, 刘纪根. 关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2003, 22(3):142-150.
Cai Q G, Liu J G. Evolution of soil erosion models in China [J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(3):142-150.
- [17] 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.
Zhang G H. Research situation and prospect of the soil erosion model [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(3):389-396.
- [18] 姚文艺, 肖培青. 黄土高原土壤侵蚀规律研究方向与途径[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(2):73-78.
Yao W Y, Xiao P Q. Research direction of the study of soil erosion in the Loess Plateau [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(2):73-78.
- [19] Zuo D P, Xu Z X, Yao W Y, et al. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544:238-250.
- [20] 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.
- [21] Zhang X C, Li Z B, Ding W F. Validation of WEPP sediment feedback relationships using spatially distributed rill erosion data [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(5):1440-1447.
- [22] 李国英. 深入研究黄土高原土壤侵蚀规律[J]. *中国水土保持*, 2006(10):1-4, 67.
Li G Y. Thorough study on regular pattern of soil erosion of the Loess Plateau [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2006(10):1-4, 67.
- [23] 穆兴民, 李朋飞, 高鹏, 等. 土壤侵蚀模型在黄土高原的应用述评[J]. *人民黄河*, 2016, 38(10):100-110, 114.
Mu X M, Li P F, Gao P, et al. Review and evaluation of soil erosion models applied to China Loess Plateau [J]. *Yellow River*, 2016, 38(10):100-110, 114.
- [24] 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.
Liu B Y. *Soil Loss Prediction Model* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001.
- [25] 祁伟, 曹文洪, 郭庆超, 等. 小流域侵蚀产沙分布式数学模型的研究[J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(1):16-22.
Qi W, Cao W H, Guo Q C, et al. Study on a distributed model for soil erosion and sediment yield in small watersheds [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(1):16-22.
- [26] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000 [M]. Temple, Texas: Texas Water Resources Institute, College Station, 2002:19-506.
- [27] 姚文艺, 陈界仁, 秦奋. 黄河多沙粗沙区分布式土壤流失模型研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(4):21-26.
Yao W Y, Chen J R, Qin F. Study on the distributed forecast model of soil loss in sandy areas of Yellow River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(4):21-26.
- [28] 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, 703:135474.
- [29] Zhao Z Y, Chow T L, Rees H W, et al. Predict soil texture distributions using an artificial neural network model [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 65(1):36-48.
- [30] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 等. 基于人工神经网络的坡面土壤侵蚀研究[J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(3):32-35.
Zhao X N, Wu P T, Feng H, et al. Research on slope soil erosion based on manpower neural network [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(3):32-35.
- [31] 王光谦, 刘家宏, 李铁键. 黄河数字流域模型原理[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2005, 13(1):1-8.
Wang G Q, Liu J H, Li T J. Digital watershed model of Yellow River [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2005, 13(1):1-8.
- [32] 杨吉山, 姚文艺, 王玲玲. 黄土沟道重力侵蚀规律及机理研究[J]. *人民黄河*, 2014, 36(6):93-96.
Yang J S, Yao W Y, Wang L L. Study on the regularity and mechanism of gravity erosion in the loess gully [J]. *Yellow River*, 2014, 36(6):93-96.
- [33] Chen L D, Wei W, Fu B J, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: Review and perspective [J]. *Progress in Physical Geography: Earth*

- and Environment, 2007, 31(4):389-403.
- [34] Korup O, Densmore A L, Schlunegger F. The role of landslides in mountain range evolution[J]. *Geomorphology*, 2010, 120(1/2):77-90.
- [35] 黄河水利委员会黄河中游治理局. 黄河志-卷八-黄河水土保持志[M]. 郑州:河南人民出版社, 1993. Yellow River Middle Reaches Administration, Yellow River Conservancy Commission. Records of the Yellow River-Volume 8-Records of Soil and Water Conservation of the Yellow River[M]. Zhengzhou: Henan People's Publishing House, 1993.
- [36] 蒋德麒, 赵诚信, 陈章霖. 黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析[J]. *地理学报*, 1966, 21(1):20-36. Jiang D Q, Zhao C X, Chen Z L. Preliminary analysis of runoff and sediment sources in small watersheds in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1966, 21(1):20-36.
- [37] 韩鹏, 倪晋仁, 王兴奎. 黄土坡面细沟发育过程中的重力侵蚀实验研究[J]. *水利学报*, 2003, 34(1):51-56, 61. Han P, Ni J R, Wang X K. Experimental study on gravitational erosion process[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(1):51-56, 61.
- [38] 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.
- [39] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. RUSLE: Revised universal soil loss equation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(1):30-33.
- [40] 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.
- [41] Zeng Y, Meng X D, Wang B, et al. Effects of soil and water conservation measures on sediment delivery processes in a hilly and gully watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 616:128804.
- [42] 刘洁, 赖格英, 宋月君, 等. 水土保持措施图斑遥感识别提取研究进展[J]. *水土保持应用技术*, 2020(5):38-42. Liu J, Lai G Y, Song Y J, et al. Research progress on remote sensing identification and extraction of soil and water conservation measures map spots[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2020(5):38-42.
- [43] Huang R G, Jiang L M, Xu Z D, et al. Large-scale mapping of solifluction terraces in the southeastern Tibetan Plateau using high-resolution satellite images and deep learning[J]. *Geomorphology*, 2023, 427:108626.
- [44] 彭道松, 聂小飞, 莫明浩, 等. 基于深度学习的水土保持措施遥感解译信息提取研究[J]. *中国水土保持*, 2023(4):45-49. Peng D S, Nie X F, Mo M H, et al. Extraction of remote sensing interpretation information of soil and water conservation measures based on deep learning[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2023(4):45-49.
- [45] Wang H Z, Han D, Mu Y, et al. Landscape-level vegetation classification and fractional woody and herbaceous vegetation cover estimation over the dryland ecosystems by unmanned aerial vehicle platform[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278:107665.
- [46] Wang Z, Chen W, Xing J H, et al. Extracting vegetation information from high dynamic range images with shadows: a comparison between deep learning and threshold methods[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 208:107805.
- [47] Higginbottom T P, Symeonakis E, Meyer H, et al. Mapping fractional woody cover in semi-arid savannahs using multi-seasonal composites from Landsat data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 139:88-102.
- [48] Jia K, Liang S L, Gu X F, et al. Fractional vegetation cover estimation algorithm for Chinese GF-1 wide field view data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 177:184-191.
- [49] 刘立峰, 杜芳艳, 马宁, 等. 基于黄土丘陵沟壑区第I副区淤地坝淤积调查的土壤侵蚀模数计算[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(6):124-129. Liu L F, Du F Y, Ma N, et al. Calculation on soil erosion modulus based on sedimentation investigation of check dam in first subdivision of loess hilly-gully region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(6):124-129.
- [50] Wei W, Chen D, Wang L X, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 159:388-403.
- [51] 杨亚男, 张宏鸣, 李杭昊, 等. 结合FCN和DenseCRF模型的无人机梯田识别方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(3):222-230. Yang Y N, Zhang H M, Li H H, et al. Research on UAV terrace recognition method based on FCN and dense CRF model[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(3):222-230.
- [52] 邵辉, 高建恩, Claire Baffaut, 等. 基于SWAT模型新开发梯田模块的中国南方红壤区梯田水沙及养分流失模拟[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2014, 42(5):147-156. Shao H, Gao J E, Baffaut C, et al. Simulation of sediment and nutrients runoff of terrace in the red soil district of China using the newly developed terrace algorithm within SWAT model[J]. *Journal of Northwest A & F University*

- sity: Natural Science Edition, 2014,42(5):147-156.
- [53] Zhang Y, Shi M C, Zhao X, et al. Methods for automatic identification and extraction of terraces from high spatial resolution satellite data (China-GF-1)[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2017, 5(1):17-25.
- [54] Eckert S, Tesfay Ghebremicael S, Hurni H, et al. Identification and classification of structural soil conservation measures based on very high resolution stereo satellite data[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193:592-606.
- [55] 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):157.
- [56] Diaz-Varela R A, Zarco-Tejada P J, Angileri V, et al. Automatic identification of agricultural terraces through object-oriented analysis of very high resolution DSMs and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Environmental Management, 2014,134:117-126.
- [57] 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.
- [58] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[M]. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2015. Cham: Springer International Publishing, 2015:234-241.
- [59] Boongaling C G K, Faustino-Eslava D V, Lansigan F P. Modeling land use change impacts on hydrology and the use of landscape metrics as tools for watershed management: The case of an ungauged catchment in the Philippines[J]. Land Use Policy, 2018,72:116-128.
- [60] 张光辉. 对土壤侵蚀研究的几点思考[J]. 水土保持学报, 2020,34(4):21-30.
Zhang G H. Several ideas related to soil erosion research [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4):21-30.
- [61] Yang K J, Lu C H. Evaluation of land-use change effects on runoff and soil erosion of a hilly basin: the Yanhe River in the Chinese Loess Plateau [J]. Land Degradation & Development, 2018,29(4):1211-1221.
- [62] Jean P. Soil erosion in the anthropocene: Research needs [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018,43(1):64-84.
- [63] Moreno-de las Heras M, Nicolau J M, Merino-Martín L, et al. Plot-scale effects on runoff and erosion along a slope degradation gradient [J]. Water Resources Research, 2010,46(4):2009WR007875.
- [64] Bagarello V, Ferro V. Scale effects on plot runoff and soil erosion in a Mediterranean environment[J]. Vadose Zone Journal, 2017,16(12): vzj2017.03.0059.
- [65] 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, 2021,258:112364.
- [66] Baumann P, Misev D, Merticariu V, et al. Datacubes: towards space/time analysis-ready data[M]// Service-Oriented Mapping: Changing Paradigm in Map Production and Geoinformation Management. Cham: Springer International Publishing, 2019.:269-299.
- [67] 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.
- [68] 蔡强国,袁再健,程琴娟,等. 分布式侵蚀产沙模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2006,25(3):48-54.
Cai Q G, Yuan Z J, Cheng Q J, et al. A review of distributed model for soil erosion and sediment yield [J]. Progress in Geography, 2006,25(3):48-54.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] Wang Z J, Su Y. Assessment of soil erosion in the qinba mountains of the southern Shaanxi Province in China using the RUSLE model [J]. Sustainability, 2020,12(5):1733.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] Gallup E, Gallup T, Powell K. Physics-guided neural networks with engineering domain knowledge for hybrid process modeling[J]. Computers & Chemical Engineering, 2023,170:108111.
- [75] Jia X W, Zwart J, Sadler J, et al. Physics-guided recurrent graph model for predicting flow and temperature in river networks [M] //Proceedings of the 2021 SIAM International Conference on Data Mining (SDM). Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2021:612-620.
- [76] Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication [R].2015.
- [77] Deng T H, Zhang K R, Shen Z J. A systematic review of a digital twin city: a new pattern of urban governance toward smart cities[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2021,6(2):125-134.