

切沟侵蚀研究进展与展望

张光辉^{1,2}

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

摘要:切沟是重要的侵蚀类型,是小流域侵蚀泥沙的主要来源,对其发生发展的动力过程、形态特征、监测方法及预报模型进行系统分析和总结,是揭示切沟侵蚀发生动力学机制、治理切沟侵蚀、保护土地资源的前提和基础。通过系统分析、总结切沟及切沟侵蚀概念、切沟形态特征与测量方法、影响因素、发育动力过程和预报模型等相关研究进展,明晰了切沟概念,对比了不同测定方法的优劣,量化了影响切沟发育的关键因素,明确了切沟发育各子过程的动力机制,比较了典型切沟侵蚀模型的结构与主控因素,提出了切沟侵蚀亟待加强的研究内容。为理解切沟侵蚀形成、发育动力过程、提高切沟侵蚀治理的有效性提供理论依据。

关键词:土壤侵蚀;切沟;测定方法;动力机制;预报模型

中图分类号:S714.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)05-0001-13

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.001

Advances and Prospects for Gully Erosion Researches

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: Gully erosion is one of the significant soil erosion types and it is the key sediment source in small watershed. It is the foundation to analyze and summarize the dynamic processes of gully formation and development, geometry properties, measuring methods and prediction models for demonstrating the dynamic mechanism of gully erosion, gully control and land resource conservation. The concepts of gully and gully erosion, geometry properties and measuring methods, the key influencing factors, the dynamic processes of gully development, and erosion models were fully reviewed. The concepts were clarified and different methods for gully monitoring were compared. The key factors affecting gully formation and development were quantified. The dynamic mechanism were identified for each sub-process of gully erosion. The structure and main influencing factors of representative gully erosion models were compared. The urgent issues need to be studied in the future were proposed. This review paper is helpful for understanding the generation of gully erosion and the dynamic processes of gully development, promoting the effectiveness of gully erosion control.

Keywords: soil erosion; gully; measuring methods; dynamic mechanism; prediction model

切沟是小流域重要的侵蚀类型,切沟,特别是处于发育活跃期的切沟,是小流域侵蚀泥沙的主要来源,其发生发展过程对现代地貌特征及其演变过程具有重要意义^[1-2]。在我国,特别是西北黄土区、东北黑土区等地区,受特殊侵蚀环境和长期强烈人类扰动的双重影响,切沟是现代地理环境条件下小流域内发育最强烈的侵蚀形态,它是连接坡面和沟道的纽带,也是坡面泥沙输移的便捷通道。切沟的形成与发育,会显著提高流域水文与泥沙连通性、增大流域泥沙输移

比,导致流域侵蚀泥沙迅速增大^[3]。因此,研究、总结、分析切沟发生、发展动力过程及其临界条件,对揭示流域地貌形态演变特征、维系土地资源可持续利用、优化水土保持措施配置模式、提升生态系统服务功能等诸多方面,具有重大的科学意义和生产价值。

过去 100 年以来,国内外学者就切沟概念、形态特征、测量方法、影响因素、演变过程、动力机制、侵蚀泥沙贡献、预报模型等诸多方面,开展了大量卓有成效的研究,研究区域遍布全球除极地以外的各个地

区^[4]。近期,一些欧美学者^[5]甚至开始研究火星上切沟的形态特征及其演变趋势。本文通过文献对比分析,就切沟与切沟侵蚀、切沟形态特征与测量方法、影响切沟发育因素、切沟发育动力过程、切沟侵蚀预报模型等方面,进行了较为系统的分析与总结,提出了今后切沟侵蚀研究亟待加强的若干问题,旨在推动切沟侵蚀研究步伐,为揭示切沟侵蚀动力机制、完善切沟测量技术、构建切沟侵蚀预报模型、指导切沟综合治理提供理论和技术支撑。

1 切沟与切沟侵蚀

与其他学术概念类似,切沟概念的界定也经历了漫长的发展和完善过程,不同概念强调的角度、提出的目的各有差异,本文仅列举了一些比较有代表性的概念,便于理解对切沟认知的发展过程。1965年联合国粮农组织(FAO)将切沟定义为宽度和深度足够大、无法正常耕作的沟道^[6]。随后于1966年美国农业部土壤保持局将切沟界定为由股流冲刷形成、侵蚀表层土壤及母质、无法被常规耕作措施消除的深沟^[7]。1985年国际著名水土保持学者 Hudson^[8]将切沟定义为由侵蚀形成、具有陡峻边壁、降雨时会临时排水的水路。1996年国际土壤学会^[9]强调了切沟的形态特征认为,切沟是深度介于20~30 cm到20 m的线状地形。2001年美国土壤学会^[10]从径流流动状态角度更新了切沟概念认为,切沟是侵蚀的产物、由大暴雨过程中或雨后间歇性股流冲刷形成的渠道。在充分吸收切沟侵蚀相关研究成果的基础上,2005年Morgan^[11]对Hudson定义的切沟概念进行了完善认为,切沟是降雨过程中会出现临时性水流、相对永久、具有陡峻边壁的水路。与1985年Hudson^[8]提出的切沟概念相比,Morgan的概念强调了切沟存在的相对永久性,换言之,切沟一旦形成,如果不经人工治理,那么它就会在一定时期内,以一种特殊的地貌景观长期存在。综合分析这些概念,可以从总体上概括出国际上对切沟含义的认知,即在暴雨或大暴雨条件下,由间歇性股流冲刷形成、边壁陡峻、规模较大、无法被常规耕作消除的永久性线状沟道。根据切沟规模的大小以及能否被耕作措施消除,衍生出了临时性切沟(国内称为浅沟)和永久性切沟(国内学者认同的切沟)。上个世纪80年代中期,出现临时性切沟概念,用于表达由股流冲刷形成的、规模相对较小且能被常规耕作措施消除的侵蚀沟^[12]。2008年,美国土壤学会重新定义了浅沟概念,指由股流冲刷形成的、规模较小可被常规耕作措施填充的、下次会在同一位置出现的侵蚀沟^[13],这个概念明确指出了浅沟的一个突出特点,即浅沟虽然可以被耕作措施消除,但下次会在同一位置形成,这是浅沟有别

于细沟的最大特征。永久性切沟由下切侵蚀形成,规模大于细沟、具有陡峻边壁、沟底常有跌坎和活跃沟头的侵蚀沟^[14-16]。永久性切沟深度较大,机械无法通过横跨耕作,暴雨期间会出现间歇性径流,深度介于0.5 m到25~30 m。在切沟的发育过程中,其活跃程度存在显著差异,刚形成的切沟发展非常迅速,此时的切沟处于活跃期,主要特点是切沟内没有植被覆盖或植被稀疏,侵蚀产沙量巨大。随着切沟发育的持续进行,沟头集水区面积减小,侵蚀动力下降,切沟发育速度逐渐降低,沟底植被开始生长发育,但在暴雨条件下沟壁仍会崩塌,这种切沟处于稳定期。活跃期切沟和稳定期切沟的界定是个相对概念,目前尚无定量指标进行判断。

中国对切沟侵蚀的研究起步较早,切沟的概念也在不停地发展与完善。早在1956年,朱显谟先生^[17]在研究黄土高原土壤侵蚀类型时,依据断面形态特征和对耕作的影响,将沟蚀划分为细沟、浅沟和切沟,其中浅沟是细沟和切沟的过渡阶段。朱显谟先生^[17]定义的切沟是可切入母质或松散基岩、甚至坚硬基岩表面,深度在1 m以上、可达20~100 m,横过耕作被完全阻止,断面呈“U”或“V”形,沟底纵断面可以与坡面不一致的侵蚀沟。同年,罗来兴先生^[18]在研究黄土地貌时,将切沟划分为微型地貌,并定义为由坡面股流下切形成、多分布于凹形斜坡、宽度和深度在50 cm以上、甚至达1~2 m、不能被耕犁消除的侵蚀沟。上述定义基本上界定了切沟、特别是黄土高原切沟的基本内涵和形态特征,为随后的相关研究奠定了理论基础。2018年刘宝元等^[19]在辨析几个常用的土壤侵蚀学术术语时认为,切沟是普通耕作工具无法横跨的侵蚀沟,最初以槽形断面出现,通过沟头溯源、沟底下切和沟坡横向侵蚀,逐渐发展成“U”或“V”形,纵剖面 and 斜坡总体一致、多呈跌水状、一般切破犁底层、深入成土母质甚至疏松基岩,宽度和深度超过50 cm。切沟继续发育可能形成冲沟,是冲沟形成的必要条件。与切沟不同,冲沟的纵剖面明显小于斜坡,呈凹弧状,常发育在较大坡面上,沟尾切入沟谷地^[19]。比较上述切沟概念可以发现,不同概念的基本含义、发育过程和形态特征基本一致,细微差异集中在切沟纵断面和规模2个方面。与中国代表性的切沟概念相比,国际上的切沟概念明确强调了切沟的形态特征(陡峻边壁)和径流情况(暴雨过程及过后存在间歇性径流)。

切沟侵蚀是指切沟发生发展过程中造成的土壤侵蚀。切沟是小流域侵蚀泥沙的主要策源地,其发生发展过程对现代地貌特征及其演变过程具有重要影响^[1]。切沟侵蚀对小流域产沙的贡献随环境条件的

变化而有所差异,占小流域水力侵蚀泥沙总量的 10%~94%,具有强烈的时空变异特征。在干旱和半干旱气候条件下,切沟侵蚀泥沙可占小流域产沙总量的 50%~80%^[15],某些地区甚至高达 84%~99%^[20]。在半湿润的地中海气候条件下,切沟侵蚀泥沙的短期贡献约为 47%~51%,而中长期贡献约为 80%~83%。在我国,特别是黄土高原地区,受特殊侵蚀环境和长期高强度人类扰动的综合影响,切沟是现代地理环境条件下小流域内发育最强烈的侵蚀类型。在黄土丘陵沟壑区,切沟侵蚀泥沙占小流域产沙的 50%以上,而在高原沟壑区占小流域产沙的 80%以上^[1]。因此,深入认识切沟侵蚀动力过程,系统监测切沟形态特征的时空变化,构建小流域切沟侵蚀预报模型,对于小流域综合治理、保护土地资源、改善下游水体环境等诸多方面,具有重大意义。

2 切沟形态特征与测量方法

切沟具有一定的形态特征,常用切沟长度、周长、面积、表面宽度、沟底宽度、深度、宽深比、断面形状、断面面积、体积等指标定量表征。测定的切沟体积乘以土壤容重,即可得到切沟侵蚀量。切沟形态特征是判断切沟的重要指标,特别是切沟深度和断面面积,常被用于界定切沟,如前文中论述到的切沟深度下限临界为 20~30 cm^[15-16]或 50 cm^[17-19],而断面面积下限临界则为 929 cm²或 1 ft²^[15],但这些标准尚没有达成统一,也没有完全被认可。通过监测一段时间内切沟形态特征的变化,即可得到该时段内切沟沟头溯源、沟底下切和沟岸扩张的速率,以及切沟侵蚀量^[21-22]。不同切沟形态特征之间,可能具有一定的相关性。在很多环境条件下,切沟发育成线性景观,而测定切沟长度相对比较简单、且误差较小,因此可以建立切沟长度与体积间的函数关系,在已知切沟长度的基础上,进一步估算切沟体积和侵蚀量^[23]。与切沟深度相比,切沟面积更易测定,同时切沟面积与切沟体积之间也具有较为稳定的函数关系,因而也可以基于切沟面积监测,估算切沟体积及侵蚀量^[23]。虽然这些函数关系的建立为区域切沟形态特征及侵蚀时空变化监测提供了有力的技术支撑,但在实际应用时需要严格界定经验关系的外延范围,应根据切沟形态特征的区域分异特征,选择合理的统计参数,分析不同区域切沟形态特征及侵蚀量的时空变化规律。

切沟形态特征测量方法的分类众多,但依据大部分学者的观点,可分为传统方法和现代方法两大类。前者主要包括直尺、测针、虚拟测针和断面测定仪,而后者主要包括 GPS、激光、雷达、摄影和遥感。传统方法可以直接测定切沟断面(特别是不规则断面)特征,但现场工作量大,仅可用于小尺度(如坡面)典型

切沟形态特征定点监测。同时结果对监测点代表性的依赖性很高,在不同位置布设同样数量的监测点,可能会得到完全不同的结果^[24-26]。传统测量方法的精度较低,常在毫米级别。同时如测针法,需要将测针长期布设在测量点,存在着人为扰动、动物践踏、甚至失窃等风险。现代方法中的前 4 种,都需要到现场测量或扫描,优点是测量精度较高(可以达到亚毫米级),但缺点是野外工作量大且耗时,因而仅适用于坡面或小流域典型切沟形态特征的动态监测^[21,26-27]。同时在复杂地形条件下,如果 GPS 信号较弱,可能会影响野外工作的顺利进行。无论是 GPS 测量、激光扫描、雷达扫描,还是摄影测量,都需要根据测量点的三维坐标点云数据,构建切沟三维 DEM。图 1 为摄影测量法确定地表形态的基本过程。照片或图片的后期处理比较耗时,以 1 m²的样地为例,当采用照相摄影法、空间网格设置为 0.7 mm,则后期图像处理过程就需要 4 h。通过不同时期 DEM 的比较分析,即可得到该时间段切沟形态特征和切沟侵蚀的变化情况。切沟形态特征的测定精度,依赖于 DEM 分辨率,当分辨率达到 0.1 m 时,可利用 DEM 提取比较准确的切沟形态参数^[28-29]。随着 3D 地形重建技术的快速发展,基于运动恢复结构,使用单反数码相机,从多个角度拍摄照片,可较为准确地监测切沟形态特征及其时空变化^[30]。

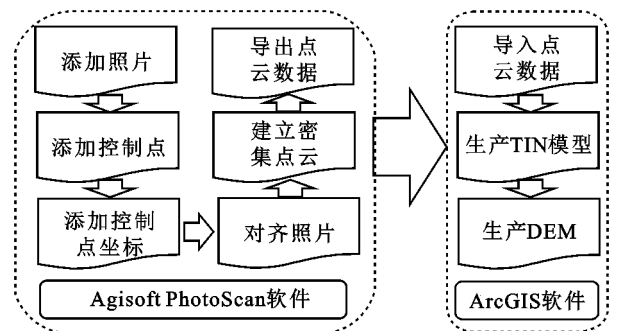


图 1 摄像测量法测定切沟形态的数据处理过程

随着遥感技术的飞速发展和遥感影像精度的不断提高,利用遥感技术监测流域或区域切沟形态特征及切沟侵蚀时空变化将会成为历史的必然。采用不同精度的高分遥感影像(如 GeoEye-1、Google Earth、Quickbird、SPOT-5、UAV 等),通过频率比、贝叶斯函数、双变量分析、逻辑回归、人工神经网络、随机森林等遥感影像解译算法的对比分析,以实测切沟形态特征为基础,遴选适宜的遥感影像及其解译方法,建立切沟形态特征实测值与遥感影像解译值间的函数关系,即可利用具有一定精度的遥感影像,分析流域或区域切沟形态特征及侵蚀量的时空变化^[31-35]。在众多机器学习方法中,随机森林和支持向量机解译切沟形态特征的精度和效率更高,可以优先使用^[36-37]。

当然,所有以光线或射线为基础的测量方法,监测切沟形态特征的精度都会受植被覆盖以及切沟复杂地形的影响,选择合理时相的遥感影像并进行必要的滤波处理非常重要^[38]。切沟侵蚀监测方法的选择,需要根据监测目标、时空尺度、精度要求进行合理选择。对于小尺度代表性切沟形态特征的短期监测,可优先使用激光扫描、GPS、摄影测量等方法。对于区域尺度切沟形态特征的中期(10~70年)监测,应优先使用遥感方法。而对于切沟形态特征与侵蚀的长期变化(百年尺度)分析,则宜使用历史文献和地图等方法^[15]。

3 影响切沟发育的关键因素

切沟是气候、地形、土壤、植被及土地利用等自然和人为因素综合作用的结果。气候是影响切沟发育的首要因素,从气候区来看,在干旱和半干旱地区切沟更易发育。气候变化,如趋于干旱少雨则植被覆盖降低,土壤结皮发育,土壤入渗速率下降,增大地表径流及其流速,必然促进切沟的形成与发育^[39]。全球气候变化导致的暴雨和干旱频率增加,势必会引起切沟发育的强烈响应。天气现象(如暴雨)与切沟形成和发育直接相关,强降雨产生的大量地表径流,迅速汇集使得其侵蚀动力快速增大,冲刷地表低洼处形成切沟沟头,或直接汇聚到已形成的切沟,引起沟头溯源、沟底下切和沟岸扩张。暴雨对切沟的影响与其特性密切相关,降雨量必须大于某一临界值才能引起切沟发育。在澳大利亚东南部松树林被采伐的裸露流域,只有当日降雨量达到 80~100 mm,切沟才会发育,当日降雨量高达 200 mm 时,流域内切沟大量发育^[40]。在美国亚热带半湿润的田纳西州,降雨量、降雨历时、平均降雨强度、最大降雨强度都与切沟发育密切相关,但不同降雨特性对切沟侵蚀过程的影响有所差异,沟底下切和沟岸扩张与前期降雨量、累计降雨量及降雨历时密切相关,而降雨量对切沟形成和发育的影响明显大于降雨强度^[41]。在黄土高原,切沟的形成与发育和暴雨密切相关,2017年7月26—27日,陕西绥德、子洲地区发生了降雨量为 252.3 mm 的特大暴雨,导致大量切沟发育(图 2),在长度仅为 10.4 km 的道路上,发育了 36 条体积介于 0.6~330.4 m³ 的切沟,给当地的交通、生产和生活带来了巨大影响和危害^[35]。

地形条件是影响切沟发育的关键因素,除坡度、坡长、坡向、高程、平面曲率、剖面曲率、集水区面积、距离道路远近、距离河道远近及沟壑密度等常规地形参数以外,表 1 给出了其他一些常用的影响切沟侵蚀的综合性地形参数及其算法^[42]。切沟主要发育在地形破碎的山区或丘陵区。陡坡上坡面径流流动快、冲

刷力强,因而陡坡上极易形成切沟^[43]。土壤物理结皮的形成和发育,会显著降低土壤入渗,因而在土壤物理结皮易发区,切沟形成的坡度会明显下降^[44]。当坡度一定时,需要一定的临界集水区面积产生足够的坡面径流,才能冲刷地表形成切沟,因而可以通过坡度和集水区面积确定切沟发育的临界地形条件:

$$S = aA^{-b} \quad (1)$$

式中: S 为坡度(m/m); A 为沟头以上集水区面积(m²); a 和 b 为经验系数,均随着环境条件的变化而变化^[45]。表 2 为典型地区不同土地利用条件下切沟发育的临界地形条件,从表 2 可知,无论是 a , 还是 b 都随着研究区域和土地利用的变化而有所不同,但 Torri 等^[52]分析了全球的相关研究后发现,系数 a 受土地利用方式影响显著,而指数 b 却相对比较稳定,坡耕地 a 值最小,依次为荒坡、草地和林地。公式(1)也可以表达为 AS^2 的形式,介于 500~4 000 m²^[49]。在干旱和半干旱地区,土壤水分是影响植被生长的限制性因子,湿润指数越大,植被生长越茂密,对切沟发育的抑制功能越强^[53]。在黄土高原丘陵沟壑区,切沟主要分布在地表湿度较大、坡度 > 35° 的阴坡凹型坡面^[54-55],而在东北黑土区,受积雪消融的影响,阳坡的切沟发育明显大于阴坡^[56]。凹型坡有利于径流汇聚,促进切沟形成和发育^[36]。沟壑密度越大,越有利于侵蚀泥沙输移,切沟越发育^[57-58]。



图 2 强降雨引起的切沟侵蚀

岩性及土壤显著影响切沟侵蚀。地质构造运动引起压力或张力的非均衡分布,形成岩石裂隙,促进岩石风化,在优先流的作用下形成地表塌陷,是地表

径流汇聚、形成切沟沟头的重要部位^[59]。虽然土壤物理结皮形成会增大表层土壤黏结力,抑制细沟间侵蚀,但随着土壤物理结皮的形成,土壤入渗速率迅速下降,大量地表径流的形成,势必会促进切沟形成和发育,因此,土壤物理结皮发育是切沟广泛分布于黄土带及其他干旱和半干旱区的重要原因之一^[60-61],也是粗骨土、砂土和冲积泥沙容易发生切沟的关键所在^[39]。土壤抗蚀性能是土壤质地的函数,因而土壤质地是影响切沟发育^[62]、特别是影响沟头溯源速率和沟头下切深度的主要因素^[63]。垂直节理发育是黄

土的显著特征,降雨时节理被径流快速填充,节理内静水压力增大,促使沟头和沟壁失稳崩塌^[63]。当土体中存在相对不透水层且降雨强度适宜时,会形成壤中流,流动过程中遇到富含钠的土层时,极易分散土壤形成洞穴,进而逐渐崩塌扩张形成切沟沟头,强淋溶性或富含蒙脱石的土壤,也存在类似现象^[64]。在黄土高原丘陵沟壑区,洞穴发育与切沟形成密切相关,面积仅为 9.1 km² 的山西省王家沟小流域,发育了 704 个切沟和 967 个洞穴,79% 的蚰蜒切沟、48% 的坡面切沟和 3% 的沟坡切沟伴随着洞穴发育^[65]。

表 1 影响切沟侵蚀的综合性地形参数与算法

参数	物理含义	算法	注解
单位面积 UA	单位坡长的面积	$UA = A/L$	m ² /m
水流功率指数 SPI	坡面径流侵蚀动力	$SPI = UA \tan S$	UA(m); S(°)
地形湿度指数 TWI	土壤水及饱和区分布	$TWI = \ln(\frac{UA}{\tan S})$	UA(m); S(°)
地形位置指数 TPI	单元格高程与相邻单元格高程均值相对大小	用 DEM 确定	正地形为正,负地形为负,线性坡为 0
坡度坡长因子 SL	地形对土壤侵蚀的影响	$LS = (UA/22.13)^{0.6} \times (\sin S/0.0896)^{1.3}$	UA(m); S(°)

表 2 典型地区切沟发育临界地形条件

研究区域	a	b	土地利用方式	研究者
乌干达	0.238	0.115	农村城镇	Zolezzi 等 ^[45]
美国	0.210	0.450	道路排水沟	Katz 等 ^[46]
比利时	0.050	0.400	坡耕地	Knapen 等 ^[47]
西班牙	0.230	0.100	坡耕地	Vandekerckhove 等 ^[48]
美国	0.180	0.500	牧草地	Montgomery 等 ^[49]
中国黄土高原	0.184	0.239	坡耕地	Wu 等 ^[50]
中国黄土高原	0.060	0.300	坡耕地	Cheng 等 ^[51]

植被是影响切沟发育的重要因素,植被生长截留降水,提升土壤入渗性能,减小地表径流过水断面,增大径流阻力,减小径流流速^[66-68],降低径流侵蚀动力。同时,植被的生长发育显著提升土壤侵蚀阻力^[69],特别是数量众多的须根系(直径<1 mm),能够显著强化土壤抗冲性^[70]。随着根系密度增大,土壤侵蚀阻力呈幂函数增大^[71]。无论是侵蚀动力降低,还是土壤侵蚀阻力增大,都会抑制切沟形成与发育。与气候相比,基于植被类型和覆盖情况的区域差异,更易解释切沟发育临界地形条件的空间变异^[48]。无论是半干旱区还是半湿润区,植被生长都可降低切沟发育风险^[72]。虽然森林覆盖被认为是抑制切沟发育的重要因素,但林地内侵蚀的相关研究较少,特别是区域尺度的相关研究更少^[73]。与森林经营和管理相关的许多活动(如伐木、道路建设、森林火灾、放牧等)都是诱发切沟发育的重要因素^[43],从而增大了森林覆盖区切沟研究的复杂性和难度。切沟形成与发育及其

侵蚀过程和放牧强度密切相关,随着植被覆盖的增大,切沟侵蚀迅速下降^[74]。植被恢复显著影响了黄土高原切沟发育过程,对黄土高原东南部 30 个平均面积为 30 hm² 的小流域监测发现,切沟沟头溯源速率为 0.23~1.08 m/a,平均为 0.51 m/a,切沟扩大面积与沟谷面积的比例变化在 0.49%~9.45%。随着切沟集水区植被盖度增大,地形对切沟发育的影响逐渐减小,当植被盖度>60%时,可有效控制切沟沟头溯源侵蚀^[75-76]。

土地利用方式及其调整显著影响切沟形成与发育过程。切沟侵蚀与农事活动及其扰动强度、农地退耕、过度放牧、森林采伐、毁林开荒、道路建设、城市化等密切相关^[43,77-78]。强烈的农事活动会促进切沟发育,坡耕地剧烈水土流失导致的土壤肥力下降、有机质减少及团聚体稳定性降低会引起土壤入渗性能下降、土壤物理结皮发育,使得坡面产流潜力增大,增加切沟形成和发育风险^[79]。过度放牧践踏草地,导致

土壤板结,草地生物量下降,土地质量退化,入渗性能减弱,促进草地切沟发育^[80]。尽管道路在小流域内所占面积较小,但道路(特别是低等级的乡村道路)路面紧实、入渗性能差,降雨时极易产生大量径流,并沿道路汇聚,当径流冲刷力足够大时,即可在道路上冲出切沟(图 2)。切沟发育与道路及其空间分布密切相关,因而距离道路远近也是评估切沟发育的关键指标之一^[43]。道路等级显著影响切沟形成与发育,受农用机械频繁碾压的乡村主干道,是切沟发育的主要土地利用类型^[35]。城市化是社会经济发展的必然结果,大量基础设施建设是城市化初期的显著特征。在基础设施建设过程中,势必会产生大量未及时硬化或覆盖的裸露地面,加之车辆或其他机械碾压的综合影响,地表径流和洪峰流量分别增大 146%~227% 和 178%~575%^[81],导致大量切沟快速发育^[82]。在过去 15 年内,乌干达科博科市内发育了大量宽深比 <3、最大深度接近 9 m、长度在 270~460 m 的切沟,充分证明了城市化进程对切沟发育的重要影响^[45]。土地利用方式的快速转变,也是影响切沟发育的重要因素。1964—2000 年间,美国爱荷华州因土地利用方式调整导致切沟体积增加 9 200 m³,相当于年均侵蚀增加 320 t^[83]。

4 切沟发育动力过程

切沟发育过程包括沟头形成、沟头溯源、沟底下切和沟岸扩张,各过程相继发生、且相互影响,并控制着切沟发育的整个过程^[84]。暴雨产生的大量地表径流,向地势低洼处汇集,当径流侵蚀动力大于土壤侵蚀阻力时,即可形成沟头。在地表径流持续冲刷下,沟头不断下切,出现明显的临空面,沟头下方形成跌穴,径流在跌穴内的快速旋转、剧烈波动以及径流沿临空面流动引起的土壤分散过程,逐渐掏蚀临空面,在沟头底部形成弧形凹陷穴。随着凹陷穴增大及径流的持续冲刷,沟头失稳崩塌,沟头溯源开始,沟头向上坡前进^[85]。从跌穴内溢出的径流,向下坡运动,速度逐渐增大,当其侵蚀动力大于土壤侵蚀阻力时,冲刷地表,形成大小不同的跌坎。随着径流的继续冲刷,跌坎不断下切,位置逐渐向上移动,最后贯通形成小型侵蚀沟^[86]。随着侵蚀沟深度增大,沟壁坡度增加,同时受降雨入渗、沟壁裂隙发育、沟壁土体重量增大、内摩擦力下降等因素的共同影响,导致沟壁崩塌,发生沟岸扩张^[87]。在暴雨的持续作用下,沟头溯源、沟底下切、沟岸扩张交替进行,侵蚀沟不断发育,最后形成规模巨大、无法被常规耕作消除的切沟。

分析切沟发育动力过程,是揭示切沟形成机理的基础,也是模拟切沟发育过程的前提。沟头溯源是侵蚀动力、土壤侵蚀阻力和时间的函数,受控于径流

量、流速、冲刷角度、沟头高度以及土壤抗蚀性能^[88]。依据沟头崩塌力学机制,分析土壤抗剪强度与土壤抗蚀性能间的函数关系,是探讨沟头溯源动力机制的有效途径^[58],只有当径流剪切力大于土壤临界剪切力时,沟头溯源侵蚀才开始发生。而土壤临界剪切力是土壤质地、土地利用类型以及植被特征的函数^[15,40]。径流的持续冲刷,必然导致切沟深度逐渐增加,但随着切沟深度加大,土壤容重增大,土壤侵蚀阻力随之增加,当径流剪切力小于土壤临界剪切力时,径流暂时停止下切,开始冲刷沟壁下部,导致沟壁崩塌,切沟沟岸扩张^[86]。从力学机制而言,沟岸扩张同时受径流冲刷和重力的双重影响,侵蚀过程包括径流冲刷、溅蚀驱动的泥沙输移以及沟壁崩塌,虽然在不同时间和环境条件下存在一定差异,但主体以沟壁崩塌为主^[79]。沟底快速流动的径流,不断冲刷沟壁下部,随着沟壁下部凹穴的扩大,同时受降水入渗的影响,沟壁土体重量不断增大,重力对沟壁土体的影响逐渐增强,沟壁土体内逐渐产生裂隙,裂隙内填充降水引起静水压力增大,促进裂隙的进一步发育。随着土体内含水量的增大,土体内摩擦力减小,当土体重力在潜在崩塌面的分力大于内摩擦力时,土体发生崩塌。在次降雨条件下沟壁扩张呈现发生—快速扩张—稳定—崩塌—再稳定的周期性变化特征^[89]。沟头溯源、沟底下切和沟岸扩张交替进行,导致切沟逐渐扩大。随着沟头向上坡的发展,沟头集水区面积逐渐缩小,径流量减小,冲刷力下降,当其侵蚀动力不足以冲刷沟头引起沟头溯源时,切沟趋于稳定。

切沟侵蚀与其发育过程密切相关。处在活跃期的切沟,水力侵蚀起决定作用,沟头溯源、沟底下切及沟岸扩张非常强烈,切沟形态不稳定,切沟长度、深度和宽度迅速增大。而处在稳定期的切沟相对比较稳定,切沟底部可能存在局部泥沙沉积,沟岸扩张缓慢。活跃期较为短暂,仅占切沟生命周期的 5% 左右,但 >90% 的切沟长度、60% 的切沟面积和 35% 的切沟体积,均在活跃期形成^[90]。活跃期切沟体积或侵蚀量占整个切沟生命周期的比例,随着区域环境条件的变化而变化,也随着研究方法的不同而有所差异。室内模拟试验^[91]发现,活跃期侵蚀量甚至可高达切沟侵蚀总量的 78%。

在众多切沟形态特征中,沟头溯源速率(或切沟长度)时空变化的研究最多、成果积累最丰富。在全球尺度,切沟溯源速率变化范围非常大,处在活跃期的切沟溯源速率介于 0.01~135.20 m/a,均值为 0.89 m/a,降雨日的平均雨量和沟头集水区面积是影响沟头溯源速率的关键因素^[92]。在伊朗干旱和半干旱地

区,1957—2005 年切沟沟头溯源速率呈现明显的阶段性。1956—1967 年,沟头溯源速度较快,年均 0.26 m,而 1968—2000 年和 2001—2005 年的年均溯源速率分别为 0.21、0.15 m,切沟溯源速率主要受集水区面积和土壤中淋溶物质含量控制^[57]。在罗马尼亚摩尔达维亚高原,切沟溯源速率多年均值为 0.92 m/a^[93],而在比利时黄土带,切沟溯源速率高达 1.8 m/a^[94]。在我国东北漫川漫岗区,处在活跃期的切沟溯源速率平均为 1.0 m/a,个别切沟可达 4~5 m/a,更有甚者高达 12 m/a^[95]。与切沟溯源速率的研究相比,切沟其他形态特征时空变异的研究非常少、且不系统。摩洛哥半干旱半湿润地区的研究^[96]发现,在 2001—2009 年的 8 年期间,切沟面积和切沟密度分别增大 11%~91%和 81%~109%,说明切沟形态特征的时空变化比较复杂,不同切沟形态参数的时间变化存在明显差异。在黄土高原丘陵沟壑区,植被恢复显著影响了切沟发育过程。在实施“退耕还林(草)”工程以前的 1976—1997 年间,被调查的 7 条大切沟面积和周长分别增大了 11.0%~180.5%和 8.1%~86.8%,而分布于大切沟沟谷谷缘的小切沟溯源速率为 0.26~0.84 m/a^[97]。而“退耕还林草”工程实施后,2004(2007)—2013 年陕西省吴起县的切沟面积

变化在 0.41~36.76 m²/a,平均为 10.32 m²/a^[23,76],远低于无植被覆盖条件下的全球平均值。

5 切沟侵蚀敏感性评估与预报模型

切沟侵蚀敏感性表征了切沟发育的可能性,敏感性评估是近期切沟研究的热点,大体思路见图 3。根据研究目的选择研究区域及代表性切沟,利用前文叙述的切沟监测方法,测量切沟的形态特征,确定切沟侵蚀量,同时收集或测定影响切沟的影响因素,主要包括气候、岩性、土壤、地形、植被和土地利用情况。将切沟数据随机划分为模型率定数据集(60%或 70%)和模型验证数据集(40%或 30%),利用双变量分析、人工神经网络、随机森林等算法,基于率定数据集确定各影响因素对切沟发育的相对贡献率。通过验证数据集、以 ROC(receiver operating characteristic curve,接受者操作特征)曲线和 AUC(area under curve,曲线下面积)曲线,遴选评估切沟发育敏感性的最佳或适宜模型^[36-37,42]。理想条件下 AUC 的值为 1,而 0.5 则表示模型精度不可接受。介于 0.5~0.6 为差,0.6~0.7 为一般,0.7~0.8 为好,0.8~0.9 为很好,0.9~1.0 为优秀。切沟发育敏感性评估的结果可用概率表征,也可以划分成等级(很低、低、中、高、很高)用图表示。

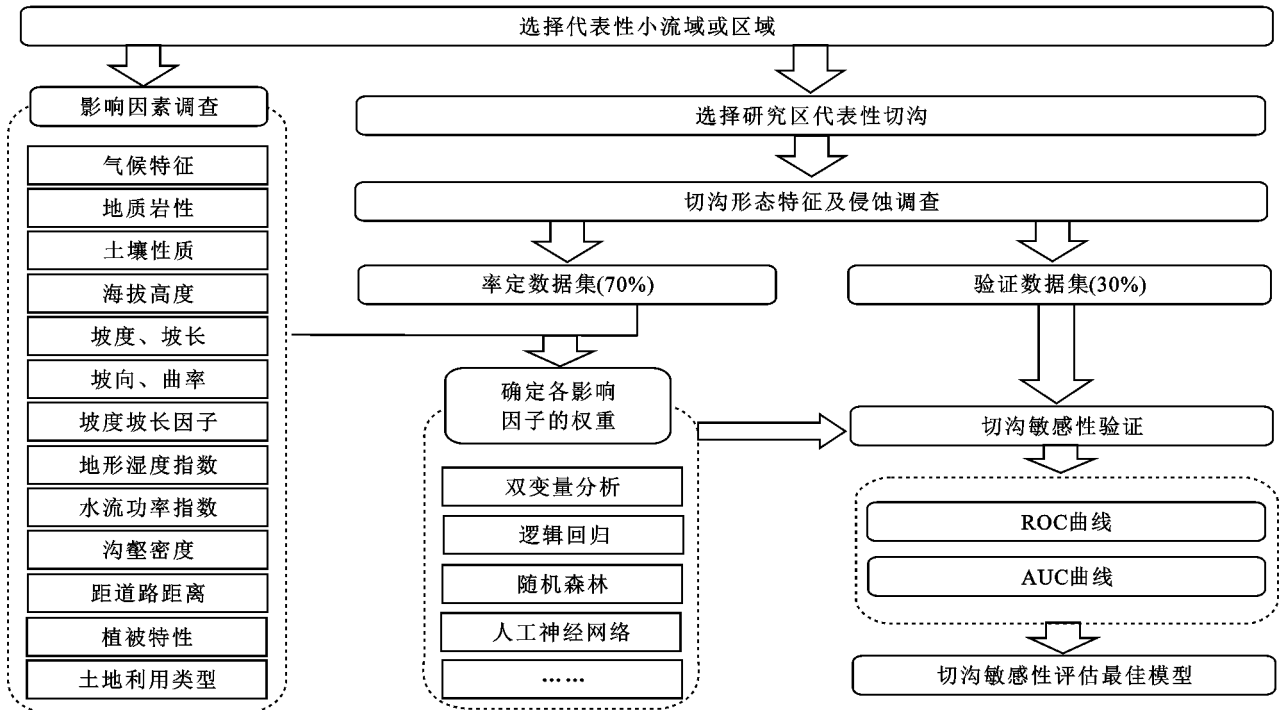


图 3 切沟侵蚀敏感性评估过程示意

与坡面细沟间和细沟侵蚀相比,切沟侵蚀模型研发相对滞后且更为复杂。目前对影响切沟发育的动力过程知之甚少,且它们都随环境条件的变化而变化^[98]。根据模型结构和原理,可将切沟模型分为经验模型和过程模型 2 类。前者参数较少且较易获取,

因而相关研究明显多于后者,但机理或过程模型是切沟侵蚀模型研究的方向,急需加强研究。切沟侵蚀经验模型研究集中在沟头发育、沟头溯源和沟岸扩张几个方面。沟头形成是切沟发育的基础和前提,因而准确预测切沟沟头出现的位置极为重要。采用切沟发

育临界地形条件($S = aA^{-b}$),是预测切沟沟头发育位置最常用的方法^[40,50]。虽然许多学者^[15,49]认为,系数 a 为常数,指数 b 随着环境条件的变化而变化,且介于 0.500~0.875,但 Torri 等^[52]通过元分析评估全球切沟沟头发育地形临界条件时发现,土地利用方式显著影响系数 a ,而指数 b 与土地利用类型无关。气候、砾石覆盖和流域持水性能对系数 a 具有一定影响。对于给定的 b 值,可利用美国土壤保持局(USDA—SCS)径流曲线数 CN 、砾石覆盖、土壤性质和植被属性估算 a 值,进而预测切沟沟头发育位置。

切沟溯源经验模型是利用野外切沟沟头溯源速率、沟头高度、集水区面积及降雨特性等相关实测资料,经过统计分析构建的统计方程,模型参数较少且易获得,是模拟切沟溯源侵蚀的主要方式^[92,99]。沟头溯源速率常用沟头集水区面积、日降雨量大于某一临界值年降水总量的幂函数模拟,而沟头溯源体积则可用沟头集水区面积和降雨日平均降水量的幂函数估算^[92]。沟头溯源是径流侵蚀动力与土壤侵蚀阻力综合作用的结果,因而可以构建基于土壤侵蚀阻力特征、日径流量和沟头高度的函数,模拟沟头溯源速率,而土壤侵蚀阻力可以用土壤抗蚀性能、植被覆盖和根系面积比估算^[85]。沟头初始宽度是切沟重要的形态特征,是沟头溯源侵蚀的结果,必然和坡面径流密切相关,可用洪峰流量、曼宁系数、坡度和土壤临界剪切力估算。与沟头初始宽度类似,沟头下切深度也是径流量、坡面坡度、土壤属性和农事活动的函数^[63]。无论是沟头形成,还是沟底下切都是径流、特别是次降雨洪峰流量的函数,而洪峰流量可以用径流深、集水区面积及汇流时间估算,径流深度可以用 SCS 曲线数法确定,汇流时间则是集水区长度与坡度及径流曲线数 CN 的函数。沟壁扩张速率主要受降雨特性、土壤属性、切沟断面形态、植被生长及径流流量影响,室内模拟降雨和放水冲刷试验^[87]发现,沟壁扩张随放水流量和坡度的增大而增大,随沟底初始宽度的增大而减小,可以用指数函数模拟沟宽随时间的变化过程。沟壁扩张通过坡脚冲刷、裂隙发育、沟壁崩塌和泥沙输移等过程进行。沟壁扩张必然导致切沟宽度加大,可用洪峰流量、曼宁系数、坡度和土壤临界剪切力的幂函数模拟切沟宽度的动态变化过程^[86]。

切沟过程模型研发相对滞后,相关研究成果较少。Sidorchuk^[90]根据切沟发育阶段,建立了活跃期动态模型和稳定期静态模型,并利用俄罗斯和新西兰的实测资料对模型进行了验证。动态模型的物质连续方程考虑了输入切沟泥沙、通过沟壁流入切沟泥沙以及切沟底侵蚀或沉积的泥沙。切沟下切过程是土

壤可蚀性、径流流速、径流剪切力以及土壤临界剪切力的函数,而土壤临界剪切力可利用径流阻力系数、紊动系数、泥沙密度、径流密度、团聚体稳定性、土壤黏结力和根系重量密度估算。沟壁侵蚀速率以沟壁径流流速与沟底径流流速的比值作为调整系数,对沟底侵蚀进行修正获得。泥沙沉积是泥沙沉积速度与径流流速的函数。切沟达到稳定期,则表明沟底高程随时间的变化率、切沟宽度随时间的变化率以及输沙率随切沟长度的变化率均为 0,对应的径流流速必须大于泥沙输移临界流速、小于侵蚀临界流速,二者均可根据径流流量、径流深、径流宽度、土壤中值粒径以及土壤黏结力确定^[100]。

基于美国农业部浅沟侵蚀模型是建立切沟侵蚀过程模型的另一种途径。该模型共有 23 个输入参数,主要包括地理位置、流域属性、土壤性质和降水特征 4 大类型。流域属性由切沟集水区面积、流域长度、流域坡度、股流流路长度、股流流路坡度以及土地利用、植被覆盖和土壤水文组相关的径流曲线数反映。土壤数据包括土壤等级、切沟可蚀性、土壤临界剪切力、土壤颗粒直径、容重、比重、曼宁系数、最大深度和岸边地块宽度。降水特性主要有降水分布类型、24 h 降雨量。模型输出则主要包括切沟宽度、面积和侵蚀量^[101]。

切沟侵蚀会显著改变地表景观,因而可以用景观演化模型模拟切沟发育过程^[102]。运行模型时将地表划分为不规则三角网,组成计算单元,每个单元产生的径流向最陡方向流动,当径流冲刷力足够大、冲刷导致 2 个计算单元的高度差大于临界高度时,即可形成切沟。临界高度是土壤裂隙或节理深度与沟头高度比值、沟头潜在崩塌面坡度的函数。沟岸崩塌利用库伦公式计算的稳定系数确定,是土壤黏结力、崩塌体长度、崩塌体重量、土壤内摩擦角、潜在崩塌面坡度、崩塌体下部及裂隙中静水压力、植被盖度及根系系统引起土壤黏结力增量的函数。根系提升土壤黏结力的增量可用 W_u ^[103]模型计算,是根系平均拉力、根系面积比(RAR,根系面积与土体面积的比值)的函数,后者随气候区、植物类型、土壤深度和根系直径的变化而变化^[104]。当根系直径变化为 2.5~18.0 mm 时,根系拉力变化为 2~98 MPa,而 RAR 介于 0.1%~1.0%^[105]。对于沟头下方的跌穴侵蚀过程,景观演化模型用切沟可蚀性、径流剪切力和临界剪切力的幂函数模拟。沟头溯源速率则是径流阻力、扩散系数、沟头高度、单宽流量、沟头处径流流速和弗劳德数的函数^[106]。

6 需要加强研究的若干问题

在过去 100 多年里,切沟侵蚀研究取得了长足的进展,为理解切沟侵蚀形成机制、揭示切沟发育动力过程以及治理切沟侵蚀奠定了坚实的基础,但综合分析现有研究成果,尚需要在以下几个方面加强研究:

(1)切沟概念:虽然众多学者^[11-12,17-18]界定了切沟的概念,但不同国内外学者^[11,17,19]对切沟的理解仍然存在一定的差异,甚至歧义。综合相关研究成果,可以大体上将切沟定义为由间歇性股流冲刷形成、边坡陡峻、深度 >50 cm、断面呈“V”或“U”形、纵剖面 and 斜坡基本一致、多呈跌水状、无法横跨耕作的永久性侵蚀沟。这一概念既强调了切沟形成的动力条件,又凸显了切沟的主要形态特征,也明确了切沟的判断标准,更具理论意义和实用价值。

(2)形态特征:形态特征是表征切沟的量化参数,对于判断切沟具有决定性作用。但到目前为止,对于切沟形态特征的诊断标准存在明显差异,如前文所述部分学者^[9,15-16]认为切沟的最小深度为 20 cm,其主要依据是坡耕地犁底层深度。也有学者^[17,19]认为切沟深度,应该 >50 cm。虽然两者间仅存在 30 cm 的差异,但对于切沟判断及野外调查,却具有深远的影响。也有学者^[16-17]通过界定断面面积判断切沟,众所周知,断面面积是长和宽的乘积(近似为矩形),可以有无数多个组合,同时断面面积的界定也存在着主观性,科学依据需要进一步明确。因此,急需加强切沟形态特征阈值研究。切沟不同形态特征间存在着一定的相关性(如长度与体积、长度与面积等),建立切沟形态特征间准确、可靠的相关关系,对于区域切沟侵蚀调查具有重要的实践价值,特别是当采用遥感手段监测切沟侵蚀时空变化时更是如此,但统计关系具有区域依赖性,如何建立具有普适意义的统计关系、明确统计参数与区域环境要素间的确定性关系,对于区域切沟侵蚀动态监测至关重要。

(3)监测方法:切沟监测是研究切沟侵蚀发育过程、制定切沟治理方案、评估切沟治理效益的基础,但目前的切沟监测方法体系仍然存在许多不足。传统的直尺、测针及断面仪等方法野外工作量大,由监测断面代表性导致的监测误差较大。现代的照相摄像、雷达扫描、激光扫描等方法,一方面受植被覆盖及地形突变的影响,另一方面后期室内数据处理耗时费力。利用遥感技术监测切沟时,不但受植被覆盖和地形突变的影响,也受遥感影像分辨率和解译方法的影响。另外,无法准确测定切沟深度,也是应用遥感技术监测切沟侵蚀时面临的重大技术难题。对于传统

方法,应加强监测断面对整个切沟的代表性以及监测切沟对小流域代表性的研究,建立监测断面个数、间距与监测精度间的函数关系,明确小流域适宜的切沟监测数目及其与小流域面积等流域特性间的函数关系。加强植被覆盖过滤技术研究,降低植被覆盖对切沟侵蚀监测的潜在影响。优化图形处理过程与算法,提高 3D 图像重建及切沟形态特征提取效率。确定适宜切沟侵蚀监测的遥感影像分辨率,遴选合理的解译方法及其流程。建立切沟深度与其他形态特征(如长度、面积等)间的函数关系,为利用遥感手段监测区域切沟侵蚀时空变化提供技术保障。加强不同监测方法适宜性及其地带性变化趋势研究,更好地指导区域切沟侵蚀动态变化监测。

(4)影响因素:切沟是气候、岩性、地形、土壤、植被和土地利用等因素综合作用的结果,但在不同时间和空间尺度上,各因素对切沟侵蚀影响的相对大小存在明显差异,因而需要加强不同时空尺度切沟侵蚀主控因素研究,明确主控因素的时空变化规律。同时影响切沟发育的诸多因素间存在着明显的耦合机制或交互作用,如气候变化必然会引起植被以及土地利用方式的响应,切沟发育导致局地地形的改变,势必会驱动土壤水分、植被生长特征等因素发生变化,在切沟整个生命周期内,各因素间的交互作用究竟如何变化并影响切沟演变过程,需要加强研究。量化各个因素对切沟的影响,也存在很大的不确定性,到底哪种或者哪些机器学习方法,可以较为精准地确定不同因素对切沟的影响,以及不同方法对应的最小数据集,都需要强化研究。

(5)动力机制:揭示切沟形成、发育过程的动力机制,是治理切沟侵蚀的基础。许多学者认为切沟是经细沟、浅沟演变而来,的确,细沟—浅沟—切沟—冲沟组成了黄土高原完整的沟蚀体系,但不同类型沟蚀形成的动力条件存在显著差异,在确定的动力条件下必然会形成对应的沟蚀类型,那么切沟侵蚀形成的临界动力条件(如切沟发育地形临界条件)及其时空变化特征,急需加强研究。切沟发育过程包括了沟头形成、沟头溯源、沟底下切及沟岸扩张等子过程,各个子过程发育的动力过程及其主控因素需要进一步明确,不同子过程之间的耦合作用与机制需要探索。切沟发育可以界定为活跃期和稳定期,那么活跃期和稳定期的临界点及影响因素阈值,究竟如何确定并量化,亟待研究。在全球气候变化、土地利用调整、城市化进程及工程建设非常明显或迅速发展的大背景下,极端暴雨和干旱、植被恢复、城市内涝和强烈的工程扰

动,对切沟发育过程的潜在影响及其动力机制,需要进一步加强研究。

(6)预报模型:切沟侵蚀模型研发是对切沟形成过程与机理、影响因素等相关研究成果的总结与集成,也是切沟治理的迫切需求。当前对于切沟发育敏感性评价的相关研究,受遥感影像分辨率、解译方法以及影响因素相对贡献率确定方法的制约,所得结果具有很大的不确定性,需要加强研究的内容已在前文论述,这里不再赘述。经验模型简单易行,对数据的依赖性较弱,是目前切沟侵蚀预报模型的主流,但模型结构与参数不统一,适用范围比较模糊,因此需要加强经验模型结构与参数的规范性研究,建立强大的参数数据库,确定参数时空变化,明确模型的适用范围和条件。受对切沟发育动力过程认知的限制,切沟侵蚀过程模型研发相对滞后,在加强切沟侵蚀动力过程与机制研究的同时,应强化小流域切沟侵蚀过程模型研发,模型可以在 GIS 系统下运行,从而可以借助 GIS 系统强大的地形与水文分析功能。在时间尺度上,应优先考虑次降雨,模型的基本模块应该包括地理位置、气候特性(降水和降雪)、地形条件、土壤性质、植被特性(地上和地下)、水文过程(产流及汇流)、侵蚀过程(沟头形成、沟头溯源、沟底下切、沟岸扩张)。在模型验证的基础上,加强切沟侵蚀过程模型与小流域土壤侵蚀过程模型的耦合,提升小流域土壤侵蚀预报模型的预测精度,更好地为小流域水土保持规划、设计及水土保持效益评估提供服务。

参考文献:

- [1] 郑粉莉.沟蚀过程研究进展[J].农业工程学报,2016,47(8):48-59,116.
- [2] 伍永秋,刘宝元.切沟、切沟侵蚀与预报[J].应用基础与工程科学学报,2000,8(2):134-142.
- [3] Heckmann T, Cavalli M, Cerdan O, et al. Indices of sediment connectivity: Opportunities, challenges and limitations[J].Earth-Science Reviews,2018,187:77-108.
- [4] Castillo C, Gomez J. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches[J].Earth-Science Reviews,2016,160:300-319.
- [5] Conway S J, Butcher F E, de Haas T, et al. Glacial and gully erosion on Mars: A terrestrial perspective[J].Geomorphology,2018,318:26-57.
- [6] FAO (Food and Agriculture Organization). Soil erosion by water. Some measures for its control on cultivated lands[R].FAO Agricultural Paper,1965:81.
- [7] Soil Conservation Service. Procedures for computing gully erosion[R]. SCS Technical Release, U.S. Department of Agriculture, Washington D. C,1966.
- [8] Hudson N W. Soil Conservation. London: Batsford. Conservation practices and runoff water disposal on steep lands[C].In: Moldenhauer W C, Hudson N W (Eds). Conservation farming on steep lands [M].Ankeny, SWCS,1985.
- [9] Bergsma E, Charman P, Gibbons F. Terminology for Soil Erosion and Conservation[M]. Wageningen; Netherlands,1996.
- [10] Soil Science Society of America. Glossary of soil science terms[R]. Soil Science Society of America, Madison, WI., USA, 2001.
- [11] Morgan R P C. Soil Erosion and Conservation[C]. In: Hudson N W (Ed.). Soil Conservation[M]. Iowa State University Press,1995:283-290.
- [12] Foster G R. Understanding ephemeral gully erosion[C] // Committee on Conservation Needs and Opportunities, Soil Conservation Ed., Assessing the National Resources Inventory, Board on Agriculture, National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C.,1986:90-125.
- [13] Soil Science Society of America. Glossary of Soil Science Terms [R]. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA,2008.
- [14] Bradford J M, Piest R F. Erosional development of valley-bottom gullies in the upper midwestern United States[C] // In: Coates D R, Vitek J D (eds.), Thresholds in geomorphology[M]. George Allen and Unwin, Boston,1980:75-101.
- [15] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J].Catena,2003,50:91-133.
- [16] Poesen J, Valentin C. Gully erosion and global change [J].Catena,2003,50:2-4.
- [17] 朱显谟,黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报,1956,4(2):99-114.
- [18] 罗来兴,划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间与沟谷的地貌类型[J].地理学报,1956,22(3):201-222.
- [19] 刘宝元,杨扬,陆绍娟.几个常见土壤侵蚀术语辨析及其生产实践意义[J].中国水土保持科学,2018,16(1):9-16.
- [20] Samani A N, Wasson R J, Malekian A. Application of multiple sediment fingerprinting techniques to determine the sediment source contribution of gully erosion: Review and case study from Boushehr province, southwestern Iran[J].Progress in Physical Geography, 2011,35:375-391.
- [21] Cheng H, Zou X Y, Wu Y Q, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the loss plateau of China[J].Soil & Tillage Research,2007,94:4-14.
- [22] 朱良君,张光辉,李振炜,等.一种基于线结构光技术的细

- 沟形态测量系统[J].山地学报,2015,33(6):770-776.
- [23] Li Z, Zhang Y, Zhu Q K, et al. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area[J].*Catena*,2017,148:195-203.
- [24] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.GPS 和 GIS 进行短期沟蚀研究初探:以东北漫川漫岗黑土区为例[J].水土保持学报,2004,18(4):16-19,41.
- [25] 董一帆,伍永秋.利用虚拟插杆对切沟沟底不同部位短期变化的初步研究[J].地理科学,2010,30(6):892-897.
- [26] Castillo C, Perez R, James M, et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion[J]. *Soil Science Society of America Journal*,2012,76:1319-1332.
- [27] Hu W S, Liu J Y, Cai Q G, et al. Assessment of gully erosion in a semi-arid catchment of the Loess Plateau, China using photogrammetric techniques[J]. *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*,2005,5884:1-9.
- [28] 张鹏,郑粉莉,王彬,等.高精度 GPS、三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究[J].水土保持通报,2008,28(5):11-15,20.
- [29] 吴红艳,郑粉莉,徐锡蒙,等.不同分辨率 DEM 提取切沟形态特征参数的转化研究[J].水土保持学报,2016,30(6):147-152,161.
- [30] 李俊利,李斌兵,柳方明,等.利用照片重建技术生成坡面侵蚀沟三维模型[J].农业工程学报,2015,31(1):125-132.
- [31] 李镇,张岩,杨松,等.Quickbird 影像目视解译法提取切沟形态参数的精度分析[J].农业工程学报,2014,30(20):179-186.
- [32] 那嘉明,杨昕,李敏,等.黄土高原切沟地貌学研究述评[J].地理与地理信息科学,2016,32(4):68-75.
- [33] 唐杰,张岩,范聪慧,等.使用高分遥感立体影像提取黄土丘陵区切沟参数的精度分析[J].农业工程学报,2017,33(18):111-117.
- [34] Hosseinalizadeh M, Kariminwjad N, Chen W, et al. Spatial modelling of gully headcuts using UAV data and four best-first decision classifier ensembles (BFTree, Bag-BFTree, RS-BFTree, and RF-BFTree) [J]. *Geomorphology*,2019,329:184-193.
- [35] Zhang Y, Zhao Y Y, Liu B Y, et al. Rill and gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*,2019,284:e106580.
- [36] Amiri M, Pourghasemi H R, Ghanbarian G A, et al. Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms[J].*Geoderma*,2019,340:55-69.
- [37] Garosi Y, Sheklabadi M, Pourghasemi H R, et al. Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping[J].*Geoderma*,2018,330:65-78.
- [38] 马鼎,李斌兵,黄土沟壑区切沟植被的激光点云滤波及地形构建[J].农业工程学报,2013,29(15):162-171.
- [39] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J].*Catena*,2005,63:132-153.
- [40] Prosser I P. Thresholds of channel initiation in historical and Holocene times, southeastern Australia[C]// In: Anderson M G, Brooks S M (Eds.), *Advances in Hillslope Processes*, 2. Wiley, Chichester, UK,1996:687-708.
- [41] Luffman I E, Nandi A, Spiegel T. Gully morphology, hillslope erosion, and precipitation characteristics in the Appalachian Valley and Ridge province, southeastern USA[J].*Catena*,2015,133:221-232.
- [42] 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.
- [43] Selkimaki M, Gonzalez-Olabarria J R. Assessing gully erosion occurrence in forest lands in Catalonia (Spain)[J].*Land Degradation & Development*,2017,28:616-627.
- [44] Valentin C, d'Herbes J, Poesen J. Soil and water components of vegetation patterning[J].*Catena*,1999,37:1-24.
- [45] Zolezzi G, Bezzi M, Spada D, et al. Urban gully erosion in sub-Saharan Africa: A case study from Uganda[J].*Land Degradation and Development*,2018,29:849-859.
- [46] Katz H A, Daniels J M, Ryan S. Slope-area thresholds of road-induced gully erosion and consequent hillslope-channel interactions[J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2014,39:285-295.
- [47] Knapen A, Poesen J. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions[J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2010,35(2):217-228.
- [48] Vandekerckhove L, Poesen J, Wijdenes O D, et al. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe[J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2000,25:1201-1220.
- [49] Montgomery D, Dietrich W. Channels initiation and the problem of landscape scale[J].*Science*,1992,255:826-830.
- [50] Wu Y Q, Cheng H. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system[J].*Catena*,2005,63:154-166.
- [51] Cheng H, Wu Y Q, Zou X Y, et al. Study of ephemeral gully erosion in a small upland catchment on the Inner-Mongolian Plateau[J].*Soil & Tillage Research*,

- 2006,90:184-193.
- [52] Torri D, Poesen J. A Review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments[J].*Earth-Science Reviews*,2014,130:73-85.
- [53] Gomez-Gutierrez A, Conoscenti C, Angileri S E, et al. Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two Mediterranean basins: Advantages and limitations[J].*Natural Hazards*,2015,79:291-314.
- [54] 李斌兵,郑粉莉,张鹏.黄土高原丘陵沟壑区小流域浅沟和切沟侵蚀区的界定[J].*水土保持通报*,2008,28(5):16-20.
- [55] 张文杰,程维明,李宝林,等.黄土高原丘陵沟壑区切沟侵蚀与地形关系分析:以纸坊沟流域为例[J].*地球信息科学学报*,2014,16(1):87-94.
- [56] Wang R H, Zhang S W, Yang J C, et al. Integrated use of GCM, RS, and GIS for the assessment of hillslope and gully erosion in the Mushi river sub-catchment, northeast China[J].*Sustainability*,2016,8:e317.
- [57] Samani A N, Ahmadi H, Mohammadi A, et al. Factors controlling gully advancement and models evaluation (Hableh Rood Basin, Iran)[J].*Water Resource Management*,2010,24:1531-1549.
- [58] Zhao J, Vanmaercke M, Chen L, et al. Vegetation cover and topography rather than human disturbance control gully density and sediment production on the Chinese Loess Plateau[J].*Geomorphology*,2016,274:92-105.
- [59] Planchon O, Fritsch E, Valentin C. Rill development in a wet savannah environment[J].*Catena*,1987,8:55-70.
- [60] Hessel R, van Asch T. Modelling gully erosion for a small catchment on the Chinese Loess Plateau[J].*Catena*,2003,54:131-146.
- [61] Kakembo V, Rowntree K. The relationship between land use and soil erosion in the communal lands near Peddie town, eastern Cape, South Africa[J].*Land Degradation and Development*,2003,14:39-49.
- [62] Barrio P B, Campo-Bescos M A, Gimenez R, et al. Assessment of soil factors controlling ephemeral gully erosion on agricultural fields[J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2018,43:1993-2008.
- [63] Wells R, Bennett S, Alonso C. Effect of soil texture, tailwater height, and porewater pressure on the morphodynamics of migrating headcuts in upland concentrated flows[J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2009,34:1867-1877.
- [64] 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.
- [65] Zhu T X. Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau, China[J].*Geomorphology*,2012,153/154:144-155.
- [66] 曹颖,张光辉,唐科明,等.地表模拟覆盖率对坡面流阻力的影响[J].*水土保持学报*,2010,24(4):86-89.
- [67] 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.
- [68] 易婷,张光辉,王兵,等.退耕草地近地表层特征对坡面流流速的影响[J].*山地学报*,2015,33(4):257-266.
- [69] Sun L, Zhang G H, Liu F, 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.
- [70] 李勇,徐晓琴,朱显谟.黄土高原植物根系提高土壤抗冲性机制初步研究[J].*中国科学*,1992,35(3):254-259.
- [71] 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.
- [72] Nogueras P, Burjachs F, Gallart F, et al. Recent gully erosion in El Cautivo badlands (Tabernas, SE Spain)[J].*Catena*,2000,40:203-215.
- [73] FAO. Assessing forest degradation - towards the development of globally applicable guidelines[R].*Forest Resources Assessment Working Paper*,177,2011.
- [74] Wilkinson S N, Kinsey-Henderson A E, Hawdon A A, et al. Grazing impacts on gully dynamics indicate approaches for gully erosion control in northeast Australia[J].*Earth Surface Processes and Landforms*,2018,43:1711-1725.
- [75] Li Z, Zhang Y, Zhu Q K, et al. Assessment of bank gully development and vegetation coverage on the Chinese Loess Plateau[J].*Geomorphology*,2015,228:462-469.
- [76] 杨松,张岩,阿尼克孜·肉孜,等.陕北黄土区植被恢复对切沟发育速度的影响[J].*中国水土保持科学*,2016,14(4):18-25.
- [77] Lesschen J P, Kok K, Verburg P H, et al. Identification of vulnerable areas for gully erosion under different scenarios of land abandonment in Southeast Spain[J].*Catena*,2007,71:110-121.
- [78] Saxton N E, Olley J M, Smith S, et al. Gully erosion in sub-tropical south-east Queensland, Australia[J].*Geomorphology*,2012,173/174:80-87.
- [79] Chaplot V, Brown J, Dlamina P, et al. Rainfall simulation to identify the storm-scale mechanisms of gully bank retreat[J].*Agricultural Water Management*,2011,98:1704-1710.

- [80] Shellberg J G, Spencer J, Brooks A P, et al. Degradation of the Mitchell river fluvial megafan by alluvial gully erosion increased by post-European land use change, Queensland, Australia [J]. *Geomorphology*, 2016, 266:105-120.
- [81] Elizondo N G, Biggs T W, Bingner R L, et al. Modeling ephemeral gully erosion from unpaved roads: Equifinality and implications for scenario analysis [J]. *Geosciences*, 2018, 8: e137.
- [82] Nyssen J. Erosion processes and soil conservation in a tropical mountain catchment under threat of anthropogenic desertification: A case study from Northern Ethiopia [D]. Belgium; Department of Geography-Geology, K.U. Leuven, 2001.
- [83] Thomas J T, Iverson N R, Burkart M R, et al. Long-term growth of a valley-bottom gully, western Iowa [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29: 995-1009.
- [84] Bingner R, Wells R, Momm H, et al. Ephemeral gully channel width and erosion simulation technology [J]. *Natural Hazards*, 2016, 80:1949-1966.
- [85] Allen P, Arnold J, Auguste L, et al. Application of a simple headcut advance model for gullies [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43:202-217.
- [86] Wells R, Momm H, Rigby J, et al. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows [J]. *Catena*, 2013, 101:114-121.
- [87] Qin C, Zheng F L, Wells R, et al. A laboratory study of channel sidewall expansion in upland concentrated flows [J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 178:22-31.
- [88] Alonso C V, Bennett S J, Stein O R. Predicting headcut erosion and migration in concentrated flows typical of uplands areas [J]. *Water Resources Research*, 2002, 38: e1303.
- [89] 李斌兵, 黄磊, 冯林, 等. 黄土坡面侵蚀沟沟岸扩张过程 [J]. *应该基础与工程科学学报*, 2016, 24(6):1147-1157.
- [90] Sidorchuk A. Dynamic and static models of gully erosion [J]. *Catena*, 1999, 37: 401-414.
- [91] Gordon L M, Bennett S J, Wells R. Response of a soil-mantled experimental landscape to exogenic forcing [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48: e10514.
- [92] Vanmaercke M, Poesen J, van Mele B, et al. How fast do gully headcuts advance? [J] *Earth-Sciences Reviews*, 2016, 154:336-355.
- [93] Ionota I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania [J]. *Catena*, 2006, 68:133-140.
- [94] Nachtergaele J, Poesen J, Wijdenes O D, et al. Medium-term evolution of a gully developed in a loess-derived soil [J]. *Geomorphology*, 2002, 46:223-239.
- [95] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫岗黑区切沟侵蚀发育特征 [J]. *地理学报*, 2007, 62(11):1165-1173.
- [96] Shruthi R B, Kerle N, Jetten V, et al. Quantifying temporal changes in gully erosion areas with object oriented analysis [J]. *Catena*, 2015, 128:262-277.
- [97] 陈一先, 焦菊英, 魏艳红, 等. 陕北黄土区退耕前(1976—1997)坡面切沟发育特征 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(17):120-127.
- [98] Poesen J, Torri D B, Vanwalleghem T. Gully erosion: Procedures to adopt when modeling soil erosion in landscapes affected by gully erosion [C] // In: Morgan R, Nearing M A. (editors). *Handbook of erosion modeling*. Wiley-Blackwell, Chichester, UK, 2011.
- [99] Zhang B J, Xiong D H, Zhang G H, et al. Impacts of headcut height on flow energy, sediment yield and surface landforms during bank gully erosion processes in the Yuanmou Dry-hot Valley region, southwest China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43:2271-2282.
- [100] Sidorchuk A, Marker M, Moretti S, et al. Gully erosion modelling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland [J]. *Catena*, 2003, 50: 507-525.
- [101] Capra A, Mazzara L M, Scicolone B. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy [J]. *Catena*, 2005, 59:133-146.
- [102] Tucker G E, Hancock G R. Modeling landscape evolution [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35:28-50.
- [103] Wu T H. Investigation on landslides on Prince of Wales Island, Alaska Geotech Report [R]. No. 5, Dpt. Of Civil Eng., Ohio State University, Columbus, USA, 1976.
- [104] Kazda M, Schmid I. Clustered distribution of tree roots and soil water exploitation [J]. *Progress in Botany*, 2008, 70:223-239.
- [105] Coder K D. Root strength and tree anchorage [R]. Warnell School of Forestry & Natural Resources, University of Georgia, 2010.
- [106] Rengers F, Lunacek M, Tucker G. Application of an evolutionary algorithm for parameter optimization in a gully erosion model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 80:297-305.