

文章编号: 1008-2786-(2020)5-658-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000543

基于坡度—汇水面积关系的黄土浅沟 与切沟沟头形成敏感区模拟

刘欣^{1,2}, 王春梅^{1,2*}, 庞国伟^{1,2}, 龙永清^{1,2}, 王雷^{1,2}

(1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 2. 西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

摘 要: 黄土高原侵蚀沟治理是黄河流域高质量发展中面临的重要问题。本研究以坡面侵蚀沟中的浅沟、切沟为研究对象, 基于高分辨率无人机航摄和野外高精度实测, 以陕北子洲岔巴沟典型小流域为研究区, 得到沟头坡度—汇水面积关系曲线, 构建了沟头形成的地形临界模型, 进行沟头形成敏感区模拟。结果表明: (1) 浅沟、切沟沟头形成临界模型分别为: $S \geq 0.6073A^{-0.142}$, $S \geq 1.2065A^{-0.229}$; (2) 综合运用沟头形成临界模型和流域坡度—汇水面积关系曲线可较为准确地预测浅沟、切沟沟头形成敏感区与非敏感区, 浅沟、切沟沟头预测准确度分别为 91.43% 和 71.79%, 非沟头区域预测准确度为 98.44%。研究结果可为黄土侵蚀沟防治提供技术支撑。

关键词: 无人机; 侵蚀沟; 沟头; 数字高程模型; 黄土高原

中图分类号: P91

文献标志码: A

土壤侵蚀是黄土高原重要的环境问题^[1], 沟道侵蚀是目前土壤侵蚀领域面临的重要挑战之一^[2-3], 在全球范围内受到广泛关注^[4-5]。黄土高原沟道发育复杂、沟道侵蚀严重, 其中浅沟和切沟是需要重点治理的两种类型^[6-7]。模拟和预测浅沟、切沟沟头形成敏感区对于黄土沟道侵蚀防控措施布设具有重要的理论与实践意义。

地形阈值模型是沟道发生规律研究的重要方法^[4,8]。沟道发育是一种突破临界条件的现象, 当坡面的剪切力大于其临界值时, 坡面有可能被破坏从而开始形成沟头, 基于坡度和汇水面积关系曲线下限值可模拟沟的发生位置^[9], 进而得到沟道发生条件的坡度—汇水面积临界模型, 其形式为: $S \cdot A^b = a$ 或 $S = a \cdot A^{-b}$ ^[10]。坡度—汇水面积临界模型被

认为是有效的沟道发生位置模拟方法, 研究者探讨了全球不同地区该模型参数^[11-12]: 其中美国落基山脉研究样区中 97 个切沟沟头得出临界公式为 $S = 0.5A^{-0.2}$ ^[13]; 在比利时黄土带得出的临界公式为 $S = 0.012A^{0.05}$ ^[14]; 在中国东北漫川漫岗地区得出浅沟、切沟的临界公式分别为 $S = 0.0631A^{-0.4643}$ 、 $S = 0.1161A^{-0.4457}$ ^[15]。黄土高原浅沟、切沟坡度—汇水面积临界模型研究较少, 且多集中在某个小流域内, 如纸坊沟拐沟、苦荞子流域研究给出了浅沟和切沟的临界公式, 即浅沟侵蚀为 $S = 0.5227A^{-0.1045}$, 切沟侵蚀为 $S = 1.9648A^{0.1351}$ ^[16]; 吴起县合家沟封育流域内退耕浅沟临界公式为 $S = 0.74A^{-0.16}$ ^[17]; 子午岭地区小流域浅沟侵蚀临界公式为 $S = 2.4334A^{-0.4334}$ ^[18]; 绥德桥沟流域切沟侵蚀临界公式则为 $S =$

收稿日期 (Received date): 2020-08-06; 修回日期 (Accepted date): 2020-10-07

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41977062, 41601290); 国家重点研发计划 (2017YFD0800502)。[National Natural Science Foundation of China (41977062, 41601290); National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800502)]

作者简介 (Biography): 刘欣 (1993-), 男, 黑龙江安达人, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字地形分析与 GIS 应用。[LIU Xin (1993-), male, born in Anda, Heilongjiang province, M. Sc. candidate, research on digital terrain analysis and GIS application] E-mail: 201831809@stumail.nwu.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 王春梅 (1983-), 女, 山东临邑人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 侵蚀地形分析。[WANG Chunmei (1983-), female, Ph. D., associate professor, research on soil erosion assessment based on remote sensing and GIS] E-mail: cmwang@nwu.edu.cn

$0.1839A^{-0.2385}$ ^[19], 该小流域退耕后梯田地形条件下浅沟侵蚀临界公式为 $S = 0.058A^{-0.3}$ ^[20]。

目前在全球不同地区关于应用坡度—汇水面积临界模型进行沟道发生位置模拟的研究已经较为深入,也取得了较好的模拟效果。然而黄土高原复杂地形条件,与世界上其他地区相比,侵蚀沟类型更为多样,同时黄土坡面浅沟、切沟宽度一般较小^[7, 21],其模拟对地形数据精度要求更高。因此目前针对黄土坡面浅沟、切沟模拟的相关研究主要集中较小流域尺度,由于所关注的地区、所使用的数据源、地形参数的计算方法不同,已有的研究结论也有较大差别,且尚未提出切实可行的沟头形成敏感区模拟方法。在黄土高原地区进一步探讨和完善浅沟、切沟坡度—汇水面积临界模型参数,并在此基础上探索浅沟、切沟沟头形成敏感区的划分方法是目前亟待研究的问题。在数据源获取上,近年来随着数字地形分析和无人机技术、现代测量技术的发展及在土壤侵蚀中的应用,在较大范围内获取高分辨率数字高程数据成为可能,为黄土浅沟、切沟发生空间规律模拟研究提供了新的机遇。

本研究在黄土高原主要产沙区以较大面积小流域 (10.87 km^2)、较大样本浅沟 (173 条)、切沟 (194 条) 为调查对象, 充分运用无人机航摄、全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 及载波相位差分技术 (Real-time kinematic, RTK) 进行野外测量, 构建适用黄土高原复杂地形条件下的沟头坡度—汇水面积临界模型, 并在此基础上探讨浅沟、切沟发生敏感区的判别方法。本研究将在黄土地区进一步完善沟道发生地形阈值理论, 并可为黄土沟道侵蚀治理与防控提供技术支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区与基础数据

研究区位于陕西省子洲县境内米脂沟流域,属岔巴沟的子流域,自然地理区划属于黄土丘陵沟壑区第一副区(图1),流域面积约 10.87 km^2 。流域内形成了典型的浅沟、切沟等坡面侵蚀沟,坡度较陡,平均坡度约为 28.7° 。流域内土地利用方式主要为草地和耕地,在较陡的坡面上仍存在坡耕地,流域内土壤侵蚀严重,是典型的黄土丘陵地貌及侵蚀

特征区域。

采用大疆精灵 4RTK 版无人机获取航摄数据,并布设地面像控点以提高数据精度,采用 Pix4dmapper 软件进行内业处理,得到米脂沟流域 0.09 m 分辨率数字正射影像图 (Digital Orthophoto Map, DOM) 及数字表面模型 (Digital Surface Model, DSM)。为减小 DSM 中隐含噪声及地表植被的影响,对有植被干扰的区域获取植被周边地表高程值与平面坐标,进而插值得到此区域 1 m 分辨率数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM);其余无植被干扰或影响较小处 DSM 重采样为 1 m,将处理后的有植被区域与无植被区域 DEM 进行拼接,得到研究区 1 m 分辨率 DEM,并提取等高线,等高距为 2 m。结合野外现场沟头 GNSS RTK 定位,参考 DOM、DEM、等高线数据,分别选取浅沟和切沟沟头点 173 个和 194 个 (图 1)。

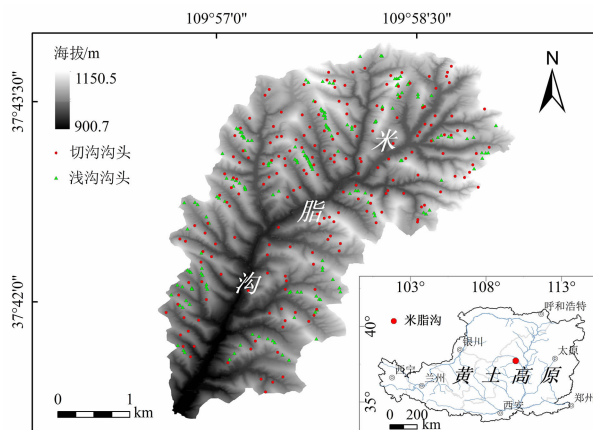


图 1 研究区及调查沟头位置图

Fig. 1 Study area and the locations of selected gully heads

1.2 技术路线

本研究基于现场测量、无人机遥感得到的DOM、DEM、等高线数据,得到浅沟、切沟沟头位置,随机选取80%数量的建模沟头点进行沟头坡度—汇水面积(Slope—Area, S—A)关系及临界公式构建,并识别浅沟、切沟沟头形成敏感区,将其余20%的沟头点用于沟头形成敏感区提取结果精度验证。总体技术路线如图2所示。

1.3 浅沟、切沟沟头调查方法

由于浅沟发生季节性强,很难把握动态位置,因此将瓦背状地形中顺坡侵蚀槽^[7]的最上端近似作为浅沟沟头位置,其表达了浅沟发生的潜在位

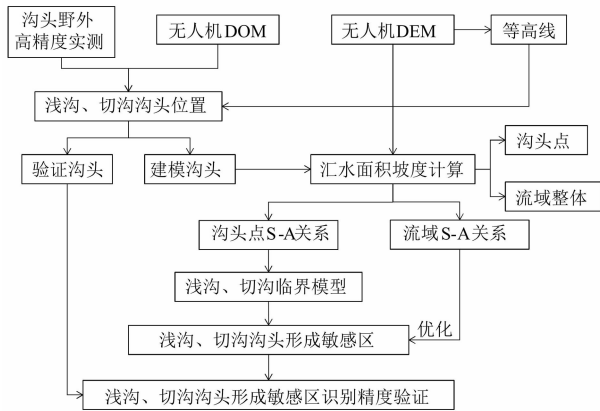


图2 技术路线图

Fig.2 Technical route diagram

置^[22];将宽度大于0.5 m,普通耕作工具无法横跨的侵蚀沟作为切沟,其开始下切处为切沟沟头^[23-24](图3)。野外调查过程中,以GNSS RTK实测记录典型沟头位置,建立无人机影像沟头位置解译标志,基于DOM进行目视解译得到浅沟、切沟沟头点位置。因径流汇聚,沟头汇水面积一般在局地范围沿等高线方向大于非沟头位置,人工目视解译的沟头位置有可能存在一定误差。本研究中用于沟头解译的影像分辨率为0.09 m,人工目视解译比例尺为1:200。在此情况下,结合汇水面积栅格数据,经过逐个沟头检查,发现人工目视解译位置误差一般在2 m以内。因此以解译沟头位置为中心,定位沿等高线方向左右各2 m范围内汇水面积最大的栅格,并将解译沟头移到该栅格位置。

1.4 沟头形成地形临界模型及敏感区预测方法

采用坡度—汇水面积关系曲线构建沟头形成的地形临界模型,进而进行沟头形成敏感区预测。

1.4.1 坡度—汇水面积关系曲线基本形式

坡度—汇水面积关系曲线(简称S—A关系曲线)是重要的沟头形成预测方法^[2]。其主要原理为当流域内土壤抗剪切力相近时,切破土壤所需的剪切力主要由坡度和汇水面积控制^[4]。坡度越大,水流下切分量越大,产生沟道所需的汇水面积越小,反之亦然。该曲线以汇水面积为横轴,以坡度为纵轴,在双对数坐标系下显示,坐标系中沟头上游汇水面积与沟头局地坡度一般呈负相关关系^[25]。

1.4.2 沟头形成临界模型构建

将每个浅沟、切沟沟头点绘入坡度—汇水面积双对数坐标系,选择处于最左下方的两个沟头点作为下限点,这两个沟头点确定的直线作为临界线^[19-20, 26]。满足沟蚀发生条件的区域位于临界线之上,临界线之下则对应无沟蚀发生的区域。该临界线在双对数坐标系中表现为直线,其对应的坡度—汇水面积关系为幂函数形式,临界模型函数表达式为:

$$S = a \times A^{-b} \quad (1)$$

式中, S 为坡度($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$); A 为汇水面积(m^2); a 值为沟蚀发生的临界值,理论上 $S \times A^b \geq a$ 时沟道产生,通常发生切沟所需的剪切力临界值大于浅沟,因此切沟的 a 值一般大于浅沟; b 值为汇水面积指数,理论上代表汇水面积的相对重要性。受



图3 沟头位置示意图:(a)典型坡面照片;(b)典型坡面无人机影像

Fig.3 Illustration of gully head locations: (a) photograph of typical slope; (b) UAV (unmanned aerial vehicle) image of typical slope

到气候、土壤、主要径流过程、降雨、土地利用状况的影响,不同地区 b 值不同。分别将流域内浅沟沟头、切沟沟头下限点的坡度、汇水面积值代入公式(1),求解出 a 、 b 值,由此得到流域浅沟、切沟发生的地貌临界公式,该临界公式被用于沟头形成敏感区识别。

1.4.3 流域坡度—汇水面积关系曲线及其对侵蚀过程的表达

流域坡度—汇水面积关系曲线(流域 $S-A$ 关系曲线)是指对流域所有栅格(而非仅沟头点位置)求其坡度和汇水面积,按汇水面积分级后,将对应分级坡度和汇水面积平均值绘入双对数坐标系得到的折线图。1.4.1 节所述沟头点 $S-A$ 关系曲线可以刻画沟头形成的地貌临界条件,而流域 $S-A$ 关系曲线常被用于刻画流域尺度由坡面侵蚀到不同级别沟道侵蚀主导的侵蚀过程^[27-28],其一般规律为:在未发生明显沟道、以坡面侵蚀为主的过程中,坡面上的点距分水岭越远,其坡度和汇水面积也就越大,此时坡度和汇水面积为正相关关系;当汇水面积达到一定阈值时,沟蚀发生,由于沟底一般较坡面平缓,坡度开始逐渐减小,此时坡度和汇水面积表现为负相关(图4)^[27]。本研究中通过流域 $S-A$ 曲线描述上述侵蚀过程,进而优化基于沟头地貌临界公式得到的沟头形成敏感区。

流域尺度 $S-A$ 关系曲线构建方法为:(1)对流域汇水面积栅格数据(栅格尺寸为 1 m)逐栅格取 \log_{10} ,参考以往研究中合适的分级间隔^[28],取 0.25 为间距进行分级;(2)计算每一分级内汇水面积均值(A)和坡度均值(S),得到 n 组 A 、 S 数据,绘入双对数坐标系中显示(图4)。这种方法将多个集水区进行综合研究,模糊了不同集水区间 $S-A$ 关系的差异,但是也避免了个别坡面或沟道导致的不确定性,适合表达流域内坡面到沟道的整体 $S-A$ 关系;(3)依据流域尺度 $S-A$ 关系曲线,通过判断曲线拐点和沟头在坐标系内的分布特点,得到坡面和不同级别沟道侵蚀主导过程的分界线,将此分界与沟头形成临界模型配合,进而优化沟头形成敏感区识别结果。

1.4.4 浅沟、切沟沟头形成敏感区识别

浅沟、切沟沟头形成敏感区识别分两步进行:(1)基于沟头形成临界模型的浅沟、切沟沟头形成敏感区初步评价。具体做法为应用公式1所述沟头

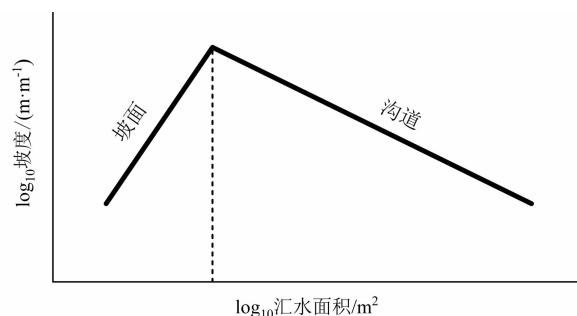


图4 坡度—汇水面积关系示意图^[27]

Fig. 4 Illustration of slope-area relationship

形成临界模型,采用地理信息软件(ArcGIS)栅格计算器,将流域坡度、汇水面积栅格数据代入临界模型,逐栅格运算得到浅沟、切沟沟头形成敏感区初步结果。该结果未对汇水面积的阈值进行界定,导致模拟结果远大于沟头实际发生范围;同时切沟的临界值 a 通常大于浅沟临界值 a ,因此该初步结果中浅沟、切沟沟头形成敏感区存在重叠区域,未能有效区分浅沟、切沟;(2)根据流域 $S-A$ 关系曲线确定汇水面积阈值,对浅沟、切沟沟头形成敏感区进一步区分和限定,得到优化后的浅沟、切沟沟头形成敏感区。具体做法是:首先,在双对数坐标系中,将流域 $S-A$ 关系曲线极值点和拐点对应的汇水面积作为分区阈值,通过这些阈值将曲线分为若干部分,实现流域 $S-A$ 曲线分区;然后将沟头点绘入流域 $S-A$ 关系曲线所在坐标系,得到流域浅沟、浅沟与切沟交错、切沟落入坐标系内分区的情况,得到浅沟、切沟所在分区的汇水面积阈值以及浅沟—切沟交错分区汇水面积阈值;最后,分别计算浅沟、切沟沟头形成敏感区初步结果中满足其所在分区汇水面积阈值的空间范围,得到优化后的浅沟、切沟沟头形成敏感区;求取浅沟、切沟沟头形成敏感区初步结果空间范围的交集,计算此交集满足浅沟与切沟交错分区汇水面积阈值的空间范围,得到优化后的浅沟—切沟沟头交错区;流域内其他区域作为非浅沟—切沟沟头区。

1.4.5 浅沟、切沟沟头形成敏感区验证方法

随机选取 20% 的沟头点作为验证沟头点(浅沟 35 个,切沟 39 个),从沟头点模拟效果和非沟头区域模拟效果两个方面验证浅沟、切沟沟头形成敏感区精度。

通过计算沟头预测准确度 D 来验证沟头点模拟效果:

$$D = N_r/N_t \tag{2}$$

式中, N_r 为落入对应发生预测区的沟头数目, 即被正确预测的沟头数目; N_t 为验证沟头总数目; D 为沟头预测准确度(%)。由于人工目视解译和野外量测沟头位置均可能存在一定范围误差, 本研究设定验证沟头落入沟头形成敏感区及周围 3 个栅格时(3 m), 沟头预测正确。

通过计算非沟头区域预测准确度 P 来验证非沟头区域模拟效果。采样系统随机抽样方法抽取 32 个非沟头验证单元。具体抽样方法为, 将流域均匀划分为 32 个格网, 在每个格网中随机选取一个实地无沟头的矩形范围, 作为非沟头验证单元。验证单元的大小依据实地考察确定, 一般满足以上条件的地块主要分布在梁峁顶、干沟/河沟沟底等, 而在这些地形部位, 10 m × 10 m 是能避免大部分浅沟、切沟沟头分布的较大单元尺寸, 因此调查单元大小采用 10 m × 10 m。统计所有验证单元内被准确预测为非浅沟一切沟形成区的面积比例平均值, 即非沟头预测准确度 P 值为:

$$P = \overline{A_{ir}/A_{it}} \tag{3}$$

式中, A_{ir} 和 A_{it} 分别为每个非沟头验证单元内, 被预测落入非浅沟切沟沟头形成敏感区的面积和验证单元总面积; $i = 1 \cdots 32$ 。

1.5 流域地形指标计算与沟头点坡度、汇水面积优化方法

传统实测方法费时费力, 在较大流域实现困难, 影像与 DEM 相结合的方法有助于快速准确地计算确定坡度、汇水面积^[11, 29]。首先, 流域坡度和汇水面积分别采用 ArcGIS 水文分析模块和坡度函数计算, 坡度单位为 $m \cdot m^{-1}$, 汇水面积单位为 m^2 。其次, 本研究对沟头的坡度和汇水面积精度要求更高, 由于沟头点坡度和汇水面积经常受局部地形影响, 从而影响模拟效果, 因此本研究中对沟头点坡度和汇水面积进行以下优化:(1)对基于水文分析的沟头上方汇水范围提取结果进行逐沟头人工目视检查, 以汇水区边界垂直等高线为原则, 参考 DOM 对汇水范围进行修正, 修正后面积为沟头汇水面积(图 5);(2)对沟头点所在坡面坡度进行综合估计作为沟头坡度。以沟头为起点, 垂直等高线方向绘制坡面线, 切沟、浅沟坡面线长度分别为 15 m、10 m, 提取坡面线位置上 DEM 高程值, 以高程作为因变量, 距坡面线起点距离作为自变量, 在

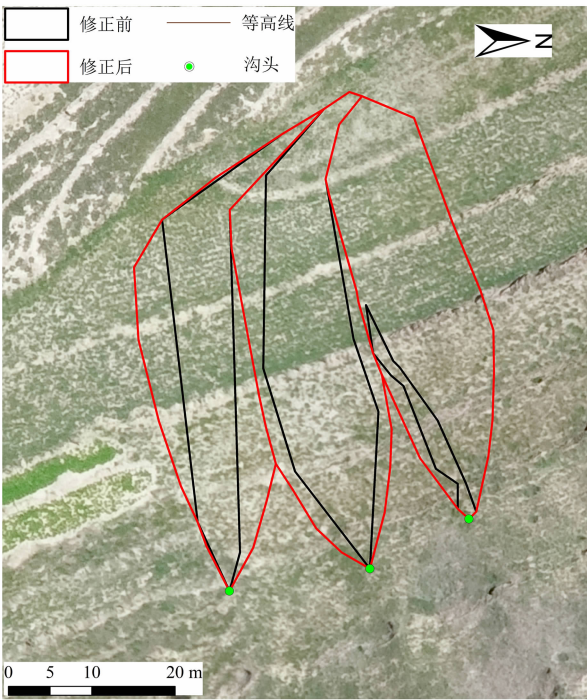


图 5 汇水范围调整示意图

Fig. 5 Illustration of drainage area adjustment

二维坐标系下拟合直线, 其斜率作为沟头坡度 ($m \cdot m^{-1}$)。

2 结果与分析

2.1 浅沟、切沟沟头坡度—汇水面积临界模型

米脂沟浅沟、切沟浅头坡度范围分别为 $0.30 \sim 0.73 m \cdot m^{-1}$ 和 $0.22 \sim 1.07 m \cdot m^{-1}$, 汇水面积范围分别为 $46 \sim 3924 m^2$ 和 $89 \sim 7237 m^2$ (表 1), 极值相差较大, 变异系数 (CV) 均大于 15%。切沟沟头坡度最小值小于浅沟沟头、最大值大于浅沟沟头, 这表明产生切沟沟头坡度的范围更广; 切沟沟头坡度和汇水面积均值、标准差、变异系数均大于浅沟, 产

表 1 米脂沟浅沟、切沟沟头地形特征

Tab. 1 Topography characteristics of ephemeral gullies (EGs) and permanent gullies (PGs) in Mizhi watershed

统计值 类型	坡度/($m \cdot m^{-1}$)		汇水面积/ m^2	
	浅沟	切沟	浅沟	切沟
最小值	0.30	0.22	46.06	89.05
最大值	0.73	1.07	3924.15	7237.14
平均值	0.49	0.51	289.57	726.01
标准差	0.09	0.14	395.46	1021.32
CV/%	18.37	27.45	136.57	140.68

生切沟所需剪切力更大,同时,相比切沟,浅沟沟头的坡度、汇水面积相对均一。

将沟头点坡度和汇水面积绘入双对数坐标系中,得到切沟、浅沟 $S-A$ 关系分布图(图6)。两种沟头在 $S-A$ 双对数坐标系下呈负相关,即较陡的坡面产生同类型沟头所需汇水面积较小,而较缓的坡面产生同类型沟头需要更大的汇水面积。浅沟沟头点在双对数坐标系下整体位于切沟沟头点左下方,说明发生切沟比发生浅沟的坡度和汇水面积临界值更大。在双对数坐标选取沟头的下界线,得出浅沟沟头的临界模型为: $S \geq 0.6073A^{-0.142}$; 切沟沟头的临界模型为: $S \geq 1.2065A^{-0.229}$ 。

2.2 浅沟、切沟沟头形成敏感区识别

应用上述浅沟、切沟发生坡度—汇水面积临界模型,基于米脂沟流域坡度和汇水面积栅格数据,初步得到浅沟、切沟沟头形成敏感区(图7)。由于临界模型只明确了沟头形成的 $S-A$ 组合关系下限,基于此计算的沟头形成敏感区为理论上的所有可能范围,与实际沟头形成范围相差较大。同时,浅沟沟头形成敏感区包含了切沟沟头形成敏感区,二者未能进行有效区分。因此该结果仅为理论上沟头形成区域最大范围,需结合目前流域浅沟、切沟发生的汇水、坡度条件进行进一步优化,从而得到更具有实践指导意义的沟头形成敏感区。考虑到相比汇水面积,沟头形成的坡度条件较为集中,因此应用汇水面积对沟头形成敏感区模拟结果进行优化。

为得到浅沟、切沟发生的汇水面积优化条件,以栅格为单元计算了流域 $S-A$ 曲线(图8)。依据曲

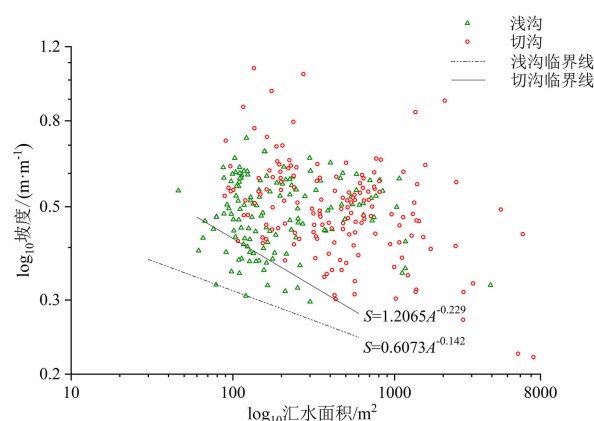


图6 米脂沟流域切沟、浅沟沟头坡度—汇水面积关系

Fig. 6 Slope - area relationship of EGs and PGs in Mizhi watershed, China

线坡度变化极值点、拐点和沟头特点将曲线分为五个分区,目视选取流域 $S-A$ 曲线的第一、二、三个极值点作为 I—IV 区分界,得到 I、II、III 区; IV、V 区界限为坐标系中,汇水面积较大切沟点附近的曲线拐点(曲线由凸变凹处),得到 IV、V 区。I 区主要为坡面侵蚀过程,对应汇水面积范围内基本无沟道产生; II 区主要为坡面上的凹形地,对应汇水面积范围内发育了较多的浅沟沟头, I 区内分散的泥沙输移过程转变为 II 区凹形地内集中的泥沙输移过程; III 区汇水面积范围内浅沟、切沟沟头均较多产生; IV 区内主要为切沟沟头; V 区主要由更高级别沟道冲淤过程主导,存在极少数切沟沟头。

依据上述分区汇水面积分界值,得到 I ~ V 区汇水面积栅格数据,其中 II、III、IV 区汇水面积范围

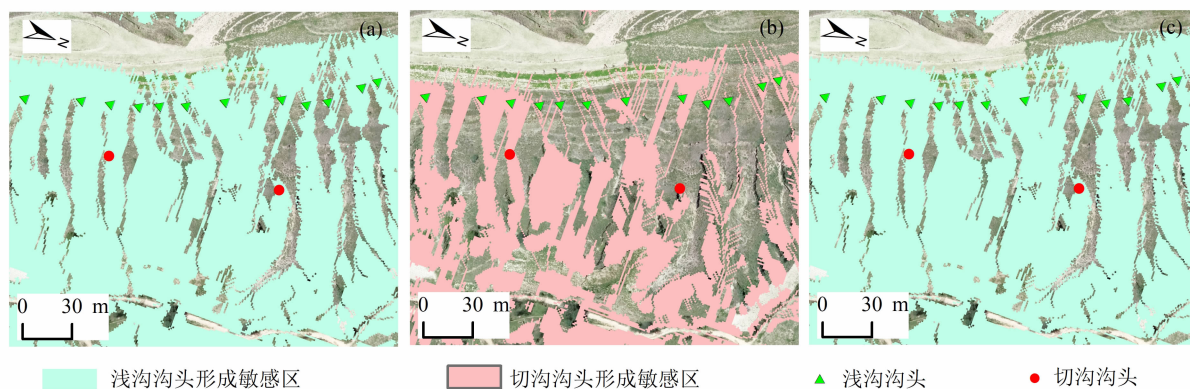


图7 基于沟头临界模型的米脂沟沟头形成敏感区提取结果

(a) 浅沟沟头形成敏感区; (b) 切沟沟头形成敏感区; (c) 无人机影像

Fig. 7 Modeling results of gully head sensitive area: (a) sensitive gully head area of EG (ephemeral gully); (b) sensitive gully head area of PG (permanent gully); (c) Image of UAV (unmanned aerial vehicle)

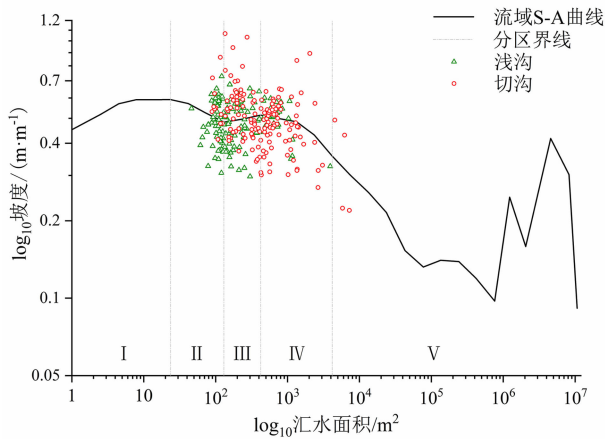


图 8 米脂沟流域坡度—汇水面积曲线

Fig. 8 Slope - area curve of Mizhi watershed

分别为 $23.5 \sim 130.19 \text{ m}^2$ 、 $130.19 \sim 750.28 \text{ m}^2$ 、 $750.28 \sim 4182.10 \text{ m}^2$ 。采用栅格数据求交集的方法,提取基于沟头临界模型的浅沟沟头形成敏感区中满足汇水面积 II 的范围,作为优化后的浅沟沟头形成敏感区;提取基于沟头临界模型的切沟沟头形成敏感区中满足汇水面积 IV 的范围,作为优化后的切沟沟头形成敏感区;提取浅沟沟头形成敏感区与切沟沟头形成敏感区满足汇水面积 III 的范围,作为浅沟一切沟沟头交错区;其余范围作为非浅沟一切沟沟头区。据此对基于沟头临界模型的沟头形成敏感区提取结果进行优化,从而得到优化后的浅沟沟头形成敏感区、切沟沟头形成敏感区、浅沟一切沟沟头交错区和非浅沟一切沟沟头区(图 9),其面积占比分别为 20.37%、0.95%、2.17% 和 76.51%。

基于 35 个浅沟验证沟头和 39 个切沟验证沟头验证上述浅沟、切沟沟头形成敏感区及浅沟一切沟沟头交错区结果,得到浅沟沟头预测准确度 D 值为 91.43%,切沟沟头预测准确度 D 值为 71.79%;基于 32 个非沟头验证单元得到非沟头区域预测准确度 P 值为 98.44%。

3 讨论

基于 $S-A$ 关系曲线得到沟道发生临界模型是目前沟道形成区预测的重要方法。在临界模型 $S \times A^b \geq a$ 中, a 值代表着沟蚀发生所需的临界值^[15, 26], a 值越大,代表该地区土壤性质等条件影响下越不容易发生沟道侵蚀; b 值代表了汇水面积的相对重要性, b 值越大,某地区沟道形成过程中受汇水面积

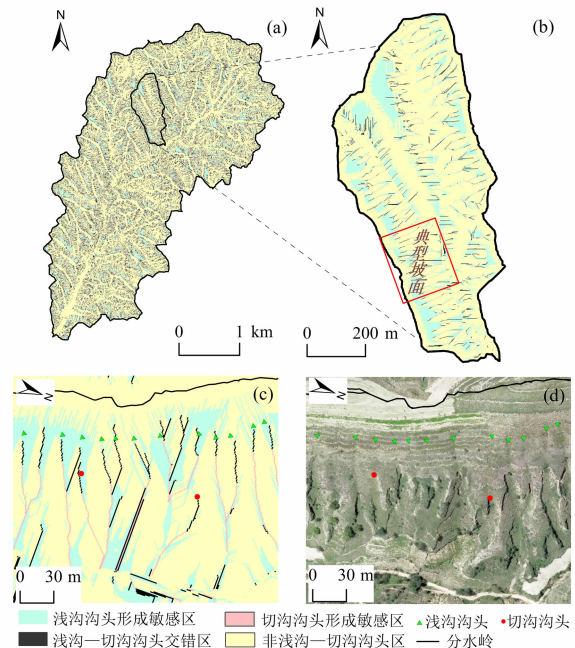


图 9 浅沟、切沟沟头形成敏感区优化图

(a) 米脂沟流域;(b) 子流域;(c) 典型坡面;(d) 典型坡面影像

Fig. 9 Optimized sensitive areas for EG heads and PG heads

(a) Mizhi Watershed, China; (b) sub-watershed of Mizhi

Watershed; (c) typical slope of the sub-watershed;

(d) UAV image of the typical slope

影响越大。 b 是汇水面积参数,理论上代表了汇水面积的相对重要性,有研究认为 b 值变化于 0.2 和 0.4 之间^[9];耕地中切沟 b 值范围为 0.104 ~ 0.303,浅沟 b 值范围为 0.13 ~ 0.414^[30]。本研究中浅沟和切沟 b 值在相关研究的 b 值合理范围内。不同地区 b 值会存在差异^[25, 26],主要受主要径流方式、气候因素、植被覆盖及类型、土壤类型、母质等的影响。

与已有研究对比,不同地区 a 值和 b 值有较大的变化。本研究表明浅沟发生临界模型中 a 值和 b 值分别为 0.61 和 0.14,切沟 a 值和 b 值分别为 1.21 和 0.23。对东北黑土区的研究表明浅沟临界模型 a 值和 b 值分别为 4.54 和 0.46,切沟分别为 7.04 和 0.45^[15]。这也印证了黄土区侵蚀沟更容易发生,同时也说明在东北黑土区汇水面积在沟道形成中的过程相对重要性大于黄土区,截断汇水是在黑土侵蚀治理中更应注意的方面,而通过梯田等措施改造较陡的梁峁坡或较陡坡地退耕在黄土沟道治理中相对黑土区更为关键。与同在黄土区的研究对比发现,典型黄土丘陵沟壑区浅沟 a 值一般在 0.5 ~ 1 之间, b 值在 0.1 ~ 0.3 之间;切沟 a 值一般

在1~2之间, b 值在0.1~0.3之间^[15-20], 这与本研究得出的结果一致。植被覆盖对浅沟、切沟发生的临界阈值模型有较大影响。在子午岭林区得到的浅沟发生临界模型中 a 和 b 值分别为2.43和0.43^[18], 比本研究 and 大部分黄土丘陵区的研究结论大, 反映了植被对于土壤保持和防止侵蚀沟形成的有效作用。在绥德桥沟的研究结果中浅沟和切沟的 a 值(分别为0.92, 1.65)也略大于本研究结果^[19, 20]。桥沟植被覆盖度较高、坡耕地较少, 而米脂沟内仍存大量的坡耕地, 这反映了土地利用方式对浅沟、切沟发育的影响^[21]。

梯田、道路、拨水沟等局地条件也会影响沟头发育的进程^[31-33]。道路等线状地物对水流起到截断转移的作用, 使部分沟头汇水面积增大或减小, 梯田等非线状地物也会改变水流方向, 同时还会影响坡度。本研究1 m 无人机数据未能完全反映这些因素的影响, 针对此问题的进一步的研究将有利于沟头形成敏感区的进一步优化。

基于沟头 $S-A$ 关系曲线构建的临界模型对沟头形成敏感区的预测结果夸大了浅沟、切沟发生敏感区的空间分布, 而综合运用流域 $S-A$ 关系曲线, 对坡面—沟道的发生过程进行量化, 进而对浅沟、切沟发生敏感区进行优化的方法可以得到更有利于实际沟道防治的沟头形成敏感区分区结果, 这也表明流域 $S-A$ 关系曲线在黄土高原复杂沟道类型条件下流域坡—沟发生序列模拟中的重要应用潜力。

4 结论

本研究基于无人机航测和野外实测, 在典型黄土丘陵区小流域, 对173个浅沟和194个切沟的沟头坡度、汇水面积进行了调查与计算, 应用坡度—汇水面积关系对沟头形成敏感区进行了模拟。主要结论如下:

(1) 浅沟、切沟沟头在坡度—汇水面积曲线双对数坐标系下显示了一定的集中规律性, 呈负相关关系。依据沟头下限点得到浅沟、切沟临界模型, 分别为: $S \geq 0.6073A^{-0.142}$, $S \geq 1.2065A^{-0.229}$ 。

(2) 基于临界模型, 并结合流域坡度—汇水面积关系曲线可以将流域划为浅沟沟头形成敏感区、切沟沟头形成敏感区、浅沟—切沟沟头交错区和非浅沟—切沟沟头区, 面积分别占流域总面积的

20.53%、0.95%、2.02% 和 76.50%。浅沟、切沟沟头预测准确度分别为91.43%和71.79%; 非沟头区域预测准确度为98.44%。

参考文献 (References)

- [1] 朱显谟. 黄土高原的综合治理[J]. 土壤通报, 1980, 2(2): 11-15. [ZHU Xianmo. Comprehensive management of Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1980, 2(2): 11-15]
- [2] CASTILLO C, GÓMEZ J A. A century of gully erosion research: urgency, complexity and study approaches [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 160: 300-319.
- [3] POESEN J. Soil erosion in the Anthropocene: research needs [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(1): 64-84.
- [4] VANMAERCKE M, POESEN J, VAN M B, et al. How fast do gully headcuts retreat? [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 336-355.
- [5] TAROLLI P, SOFIA G. Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes [J]. Geomorphology, 2016, 255: 140-161.
- [6] 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. [CHEN Yixian, JIAO Juying, WEI Yanhong, et al. Characteristics of gully development in Northern Shaanxi Hilly Loess Region before Grain-for-Green Programme (1976-1997) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(17): 120-127]
- [7] 刘宝元, 杨扬, 陆绍娟. 几个常用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. [LIU Baoyuan, YANG Yang, LU Shaojuan. Discriminations on common soil erosion terms and their implications for soil and water conservation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1): 9-16.
- [8] GUDINO-ELIZONDO N, BIGGS T, CASTILLO C, et al. Measuring ephemeral gully erosion rates and topographical thresholds in an urban watershed using unmanned aerial systems and structure from motion photogrammetric techniques [J]. Land Degradation and Development, 2018, 29: 1896-1905.
- [9] PATTON P C, SCHUMM S A. Gully erosion, Northwestern Colorado: a threshold phenomenon [J]. Geology, 1975, 3(2): 88-90.
- [10] BEGIN Z B, SCHUMM S A. Instability of alluvial valley floors: a method for its assessment [J]. Transactions of the ASAE, 1979, 22(2): 347-350.
- [11] HAYAS A, POESEN J, VANWALLEGHEM T. Rainfall and vegetation effects on temporal variation of topographic thresholds for gully initiation in Mediterranean cropland and Olive groves [J]. Land Degradation and Development, 2017, 28(8): 2540-2552.
- [12] TORRI D, POESEN J, ROSSI M, et al. Gully head modelling: A

- Mediterranean badland case study [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, **43**(12): 2547–2561.
- [13] HYDE K D, WILCOX A C, JENCOS K, et al. Effects of vegetation disturbance by fire on channel initiation thresholds [J]. *Geomorphology*, 2014, **214**: 84–96.
- [14] GEETER S D, POESEN J, VANMAERCKE M. Does the topographic threshold concept explain the initiation points of sunken lanes in the European loess belt? [J]. *Catena*, 2020, **192**: 12.
- [15] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨 [J]. *地理科学*, 2006, **26**(4): 449–454. [HU Gang, WU Yongqiu, LIU Baoyuan, et al. Geomorphic threshold model for ephemeral gully incision in Rolling Hills with black soil in Northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, **26**(4): 449–454]
- [16] 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. [LI Binbing, ZHENG Fenli, ZHANG Peng. Geomorphic threshold determination for ephemeral gully and gully erosion areas in the Loess Hilly Gully Region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, **28**(5): 16–20]
- [17] 李安怡, 吴秀芹, 朱清科. 陕北黄土区浅沟分布特征及其与立地类型的关系 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, **38**(4): 79–85. [LI Anyi, WU Xiuqin, ZHU Qingke. Distribution characteristics and relation with site type of ephemeral gully in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2010, **38**(4): 79–85]
- [18] 丁晓斌, 郑粉莉, 王彬, 等. 子午岭地区坡面浅沟侵蚀临界模型研究 [J]. *水土保持通报*, 2011, **31**(3): 122–125. [DING Xiaobin, ZHENG Fenli, WANG Bin, et al. Predicting ephemeral gully erosion on hillslopes of Ziwuling area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, **31**(3): 122–125]
- [19] WU Y, CHENG H. Monitoring of gully erosion on the Loess Plateau of China using a global positioning system [J]. *Catena*, 2005, **63**(2–3): 154–166.
- [20] CHENG H, ZOU X, WU Y, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, **94**(1): 4–14.
- [21] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展 [J]. *农业机械学报*, 2016, **47**(8): 48–59. [ZHENG Fenli, XU Ximeng, TAN Chao. A review of gully erosion process research [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, **47**(8): 48–59]
- [22] LI H, CRUSE R M, BINGNER R L, et al. Evaluating ephemeral gully erosion impact on Zea mays L. yield and economics using AnnAGNPS [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, **155**: 157–165.
- [23] RENGERS F K, TUCKER G E. The evolution of gully headcut morphology: a case study using terrestrial laser scanning and hydrological monitoring [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, **40**(10): 1304–1317.
- [24] 刘宝元, 刘刚, 王大安, 等. 区域沟蚀野外调查方法——以东北地区为例 [J]. *中国水土保持科学*, 2018, **16**(4): 34–40. [LIU Baoyuan, LIU Gang, WANG Daan, et al. A field survey method for regional gully erosion: a case study in Northeastern China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, **16**(4): 34–40]
- [25] ANDERSON C J. Comparing the slope – area threshold for stream initiation in primeval and managed forests of Northern Michigan [J]. *Forest Science*, 2020, **66**(1): 130–139.
- [26] 李浩, 杨薇, 刘晓冰, 等. 沟蚀发生的地貌临界理论计算中数据获取方法及应用 [J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(18): 128–134. [LI Hao, YANG Wei, LIU Xiaobing, et al. Data obtained method and application for topographic threshold theory calculation of gully initiation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(18): 128–134]
- [27] MONTGOMERY D R. Slope distributions, threshold hillslopes, and steady-state topography [J]. *American Journal of Science*, 2001, **301**(4–5): 432–454.
- [28] TAROLLI P, FONTANA G D. Hillslope-to-valley transition morphology: new opportunities from high resolution DTMs [J]. *Geomorphology*, 2009, **113**(1–2): 47–56.
- [29] GUDINO-ELIZONDO N, BIGGS T W, CASTILLO C, et al. Measuring ephemeral gully erosion rates and topographical thresholds in an urban watershed using unmanned aerial systems and structure from motion photogrammetric techniques [J]. *Land Degradation and Development*, 2018, **29**(6): 1896–1905.
- [30] VANDEKERCKHOVE L, POESEN J, WIJDENES D O, et al. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2000, **25**(11): 1201–1220.
- [31] 王楠, 陈一先, 白雪超, 等. 陕北子洲县“7·26”特大暴雨引发的小流域土壤侵蚀调查 [J]. *水土保持通报*, 2017, **37**(4): 338–344, 347. [WANG Nan, CHEN Yixian, BAI Leichao, et al. Investigation on soil erosion in small watersheds under “7·26” extreme rainstorm in Zizhou county, Northern Shaanxi province [J]. *Bullet of Soil and Water Conservation*, 2017, **37**(4): 338–344, 347]
- [32] JUSTIN M G, BERGEN J M, EMMANUEL M S, et al. Mapping the gap of water and erosion control measures in the rapidly urbanizing Mbezi river catchment of Dar es Salaam [J]. *Water*, 2018, **10**(1): 64.
- [33] ARABAMERI A, CERDA A, PRADHAN B, et al. A methodological comparison of head-cut based gully erosion susceptibility models: combined use of statistical and artificial intelligence [J]. *Geomorphology*, 2020, **359**: 107136.

Sensitive Area Simulation of Ephemeral and Permanent Gullies Based on Slope-Area Relationship in the Loess Region

LIU Xin^{1, 2}, WANG Chunmei^{1, 2*}, PANG Guowei^{1, 2}, LONG Yongqing^{1, 2}, WANG Lei^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity of Shaanxi Province, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Gully erosion is severe in the Loess Plateau of North China, where gully location modeling remains a challenge. The objective of this study was to explore the methodology for modeling ephemeral gullies (EGs) and permanent gullies (PGs) in gully-sensitive areas in a watershed located in Zizhou, Shaanxi Province. The critical topographic threshold model based on the slope-area relationship was employed as the primary method. High-resolution unmanned aerial vehicle (UAV) photography and high-precision field measures were utilized as data sources. The critical topographic models were $S \geq 0.6073A^{-0.142}$ for EGs, and $S \geq 1.2065A^{-0.229}$ for PGs. The gully head prediction accuracies for EGs and PGs were 91.43% and 71.79%, respectively, and the prediction accuracy for the non-gully head area was 98.44%. The results improve our understanding of the gully formation and may support gully erosion conservation in the loess region.

Key words: UAV; erosional gully; gully head; Digital Elevation Model (DEM); the Loess Plateau