

引用格式: 申华珍, 王春梅, 庞国伟, 龙永清, 王雷, 王强, 杨勤科. 黄土切沟沟头位置地形临界模型及不同土地利用下的参数差异[J]. 山地学报, 2024, 42(2): 174-184.

SHEN Huazhen, WANG Chunmei, PANG Guowei, LONG Yongqing, WANG Lei, WANG Qiang, YANG Qinke. Topographical critical model of loess gully head and its parameter determination in different land use contexts [J]. Mountain Research, 2024, 42(2): 174-184.

## 黄土切沟沟头位置地形临界模型及不同土地利用下的参数差异

申华珍, 王春梅\*, 庞国伟, 龙永清, 王雷, 王强, 杨勤科

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

c. 旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 西安 710048)

**摘要:** 切沟侵蚀是黄土高原地区重要侵蚀形式。切沟的发生存在一定的地形临界, 坡度-汇水面积 (Slope-Area) 临界模型是切沟沟头位置模拟与预测的常用方法, 对模型参数的空间分异及其不同土地利用下的参数差异的规律认识不足极大限制了该临界模型的实际应用。本研究以典型黄土丘陵沟壑区陕北岔巴沟流域为研究区, 采用无人机航摄并结合野外实测, 研究了 S-A 临界模型参数的空间分异及其不同土地利用下的参数差异。结果表明: (1) 切沟沟头坡度从上游到下游呈递增趋势, 沟头汇水面积呈递减趋势。 (2) 岔巴沟流域 S-A 临界模型切沟发生的临界常数  $a$  值和模型指数  $b$  从上游到下游变化不大, 均呈轻微递增趋势, 流域内切沟沟头发生的临界模型空间分异性不明显。岔巴沟流域上游、中游和下游的切沟沟头 S-A 临界模型参数  $a$  分别为 1.006、1.128 和 1.157, 参数  $b$  分别为 0.197、0.203 和 0.209。 (3) 切沟沟头 S-A 临界模型参数受土地利用类型的影响较大。坡耕地切沟 S-A 临界模型参数  $a$  和  $b$  分别为 0.810 和 0.159, 林草地切沟临界模型参数  $a$  和  $b$  分别为 2.007 和 0.341。林草地切沟沟头 S-A 临界模型常数  $a$  是坡耕地的近 2.5 倍, 指数  $b$  是坡耕地的近 2 倍。本研究深化了对黄土丘陵沟壑区切沟沟头发生的地形临界条件的认识, 提升了 S-A 临界模型在黄土切沟治理实践中的可用性, 将有效支撑黄土高原侵蚀精准治理。

**关键词:** 无人机; 切沟; 地形临界; 土地利用; 黄土高原

**中图分类号:** S157.1

**文献标志码:** A

土壤侵蚀是生态环境及社会经济可持续发展的重要威胁<sup>[1-3]</sup>, 切沟发育是土壤侵蚀发展到严重阶段的重要表征<sup>[4-6]</sup>。黄土高原长期受特殊侵蚀环境和人为干扰的双重影响, 是全球切沟发育最剧烈的地区之一<sup>[7-8]</sup>。局地特征对切沟的发育有重要作用<sup>[9]</sup>。地形阈值临界模型是研究切沟发生空间规律的重要方法<sup>[10-11]</sup>。了解黄土切沟沟头发生的地

形临界条件、探索切沟侵蚀规律, 是切沟侵蚀治理的关键, 也是黄土高原高质量发展的迫切需求<sup>[12-14]</sup>。

当地表径流的侵蚀能力大于土壤抗蚀能力, 会发生切沟侵蚀现象, 而径流对地表土壤的侵蚀能力受沟头上方坡度和汇水面积双重影响<sup>[14-15]</sup>。汇水面积反映了汇水区内潜在的流量, 坡度影响径流流速和侵蚀能<sup>[16]</sup>。切沟沟头坡度-汇水面积 (Slope-

**收稿日期** (Received date): 2023-10-14; **改回日期** (Accepted date): 2024-04-14

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金 (41977062)。[National Natural Science Foundation of China (41977062)]

**作者简介** (Biography): 申华珍 (1999-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土壤侵蚀空间分异。[SHEN Huazhen (1999-), male, born in Jining, Shandong province, M. Sc. candidate, research on spatial differentiation of soil erosion] E-mail: 202133186@stumail.nwu.edu.cn

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 王春梅 (1983-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 遥感与 GIS 应用、土壤侵蚀调查与模拟。[WANG Chunmei (1983-), female, Ph. D., professor, research on remote sensing and GIS applications, soil erosion investigation and simulation] E-mail: cmwang@nwu.edu.cn

Area, S-A) 临界模型常用于预测切沟沟头敏感区<sup>[17-18]</sup>, 被广泛认为是一种能有效模拟切沟发生位置的方法。研究发现, S-A 临界模型的应用在不同国家和地区<sup>[19-21]</sup>有所区别, 中国黄土高原对该模型的研究多集中在小流域内<sup>[22-24]</sup>。S-A 临界模型在切沟空间模拟与预测中有重要的应用价值, 然而由于环境条件的差异性和侵蚀过程的复杂性<sup>[25-26]</sup>, 切沟 S-A 临界模型参数在不同地区取值有较大差异<sup>[27]</sup>, 代表切沟发生的临界常数  $a$  取值范围为 0.0527 ~ 8.622, 代表汇水面积相对重要性的指数  $b$  取值范围为 0.104 ~ 1.61<sup>[15]</sup>。确定模型参数的空间分异性是模型合理应用的关键, 亟需对不同地区的临界模型参数进行系统研究<sup>[28-29]</sup>。有学者<sup>[15]</sup>对全球不同地区的临界参数进行了总结, 但对流域尺度模型参数的空间变异性缺乏深入认识, 对不同土地利用类型切沟沟头的地形临界参数对比性研究不足, 尤其是在复杂的黄土丘陵沟壑区。这方面研究的不足影

响了黄土高原小流域综合治理决策的精准性, 难以支撑目前水土保持措施的优化。

本文以黄土高原岔巴沟流域上、中、下游共 9 个典型小流域 345 条切沟为研究对象, 基于亚米级无人机数据在流域尺度构建小流域 S-A 临界模型, 研究典型黄土丘陵沟壑区坡面切沟坡度与汇水面积之间的关系特征, 探究黄土切沟 S-A 临界模型参数的空间分异性及其在不同土地利用下的差异, 以期为黄土高原切沟防治提供理论与技术支撑, 推动黄土高原高质量发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

岔巴沟流域 (109°47'E, 37°31'N) 地处陕西省榆林市子洲县 (图 1a), 位于黄土高原腹地, 属于典型黄土丘陵沟壑区第 I 副区, 流域整体呈东南—西

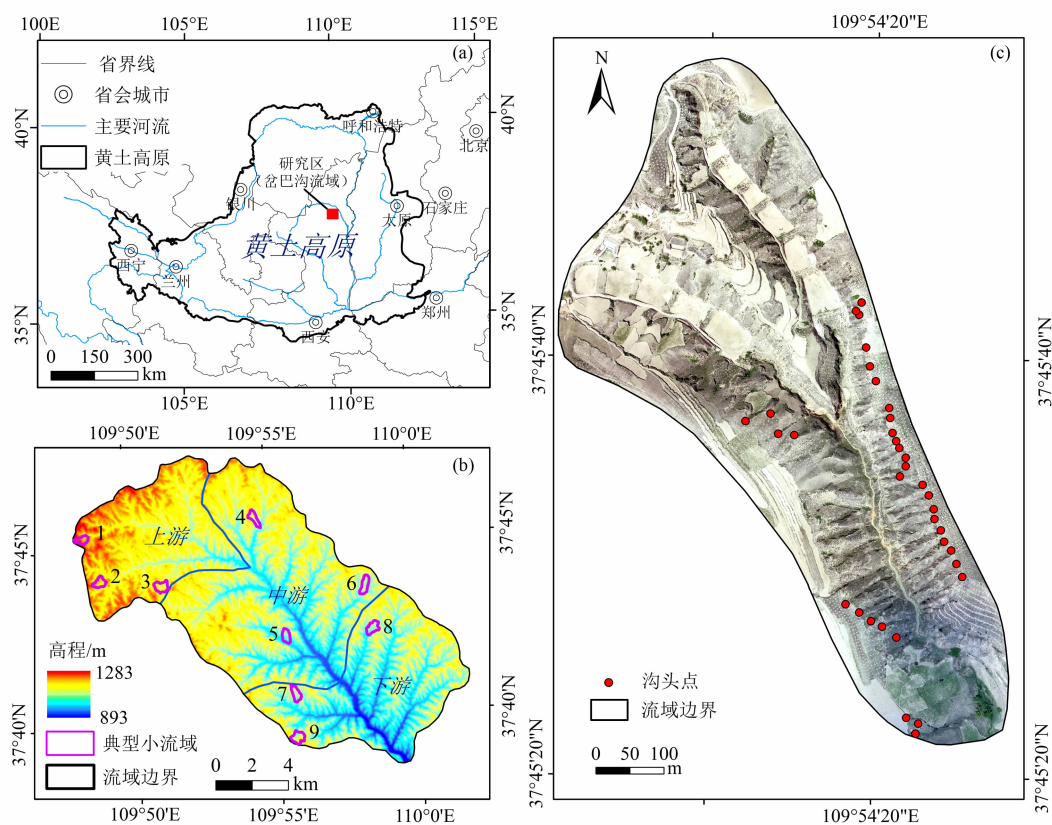


图1 研究区位置图:

(a) 岔巴沟流域位置; (b) 典型小流域分布; (c) 典型小流域切沟沟头分布

Fig. 1 Location map of study area: (a) the Chabagou valley;

(b) typical small watersheds within the Chabagou valley; (c) gully heads in a typical small watershed

(审图号: GS(2023)2767 号)

北走向,流域总面积约 207 km<sup>2</sup>。流域内坡面坡度较大,平均坡度高达 30.4°,平均坡长较短。岔巴沟流域植被覆盖度较低,主要土地利用类型为草地,其次为坡耕地,林地占比较少,土地利用不合理。流域内土壤侵蚀强烈,是黄土丘陵地貌下切沟发育十分活跃的地区<sup>[24]</sup>。依据主沟道比降变化,将岔巴沟流域划分为上、中、下游,并分别选取 3 个典型小流域(如图 1b),小流域面积为 0.25~0.40 km<sup>2</sup>,高程和坡度地形特征统计结果如表 1 所示。针对 9 个小流域内发生在坡耕地和林草地上的 345 条切沟开展研究。图 1c 为 9 个小流域中的一个典型小流域切沟沟头分布情况。

1.2 基础数据

本研究的基础数据见表 2,主要包括岔巴沟流域内高分辨率无人机航摄数据和 GNSS RTK(Global Navigation Satellite System-Real Time Kinematic)实测数据。无人机航摄数据由大疆无人机(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)于 2020 年 10 月低空获取。无人机影像 POS(Position and Orientation System)数据中位置数据采用全球导航卫星系统实时差分方式获

取,其精度达到厘米级。通过 Pix4dmapper 软件对原始航摄影像经空三解算后得到研究区内 0.15 m 分辨率的数字正射影像(Digital Orthophoto Map,DOM)及数字表面模型(Digital Surface Model,DSM)。在 DSM 数据的建立过程中,为减少噪音对数据精度造成的误差,首先需要对原始 DSM 数据进行滤波降噪处理,降噪方法采用高斯滤波算法。其次,植被的存在对 DSM 数据的计算也会造成干扰,影响局地坡度和汇水面积结果的真实性。受植被影响的区域获取周边无植被区域的高程对内插值,进而得到此区域的数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)。不受植被影响的 DSM 数据与去除植被后的 DEM 数据拼接处理,得到岔巴沟流域内无植被影响的 DEM 数据。将 DEM 数据的分辨率重采样为 1 m,重采样采用 Bilinear 法<sup>[24,30]</sup>。除此之外,团队在 2021 年 4 月对陕北岔巴沟流域内 32 条切沟进行 GNSS RTK 实测,用于验证切沟解译精度。

1.3 切沟的解译与地形指标计算

切沟是最活跃的侵蚀沟类型之一,其主要特征为不能被普通耕作工具横跨,一般切破犁底层,其纵

表 1 典型小流域地形特征统计表  
Tab.1 Statistical overview of topographic characteristics for the selected small watersheds

流域 位置	编号	高程/m			坡度/(°)		
		平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
上游	1	1144.92	1208.89	1072.49	29.58	79.44	0.06
	2	1107.76	1179.07	1029.78	30.78	79.26	0.02
	3	1186.59	1261.73	1109.46	30.78	81.79	0.06
中游	4	1042.65	1121.47	976.94	28.87	79.57	0.06
	5	1106.02	1138.00	985.63	30.65	79.23	0.04
	6	1007.48	1073.67	914.79	30.79	78.59	0.06
下游	7	1044.62	1094.24	959.41	27.47	77.52	0.01
	8	1038.19	1117.85	960.56	31.65	79.49	0.06
	9	1069.93	1150.76	965.96	35.08	79.15	0.14

表 2 基础数据  
Tab.2 Base data

数据名称	数据来源	分辨率/m	获取时间
无人机 DOM 影像	无人机(大疆精灵 4 RTK 版)	0.15	2020-10
无人机 DSM 影像	无人机(大疆精灵 4 RTK 版)	0.15	2020-10
切沟沟头实测数据	GNSS RTK	—	2021-04

剖面坡度和所在坡面坡度基本一致,深度和宽度均超过  $0.5 \text{ m}^{[1-3, 31]}$ 。本文采用上述切沟定义,利用 2020 年  $0.15 \text{ m}$  分辨率无人机航摄影像,基于野外实测数据建立解译标志,采用人工目视解译方法获取流域内坡面切沟沟头点(如图 2)。黄土高原切沟可以分为坡面切沟和底部切沟,底部切沟是指发生在古代侵蚀凹地底部的切沟,坡面切沟是指发生在除古代侵蚀凹地底部以外斜坡上的切沟<sup>[31]</sup>。本研究中只考虑沟头上方汇水范围内主要为坡耕地或林草地的坡面切沟。汇水区内主要为梯田的切沟,其沟头坡度和汇水面积受梯田干扰较大,本研究中未予考虑。

为保证切沟解译结果的精度,本研究采用了严格的解译质量控制流程。解译工作完成后由解译人员逐条切沟进行自查,若发现错误立即修正,对存在分歧的切沟沟头位置逐个讨论并修正。由质检员逐小流域对解译结果抽取 20% 进行检查,如正确率不足 95%,则需对该小流域解译结果重新修正,并再次进行上述质检步骤,直至解译结果合格。基于 2021 年 4 月岔巴沟流域内 32 条切沟的 GNSS RTK 野外实测数据,得到无人机影像切沟沟头点解译偏差仅为  $0.87 \text{ m}^{[32-33]}$ 。

切沟沟头上方坡度计算:从切沟沟头点沿沟头溯源侵蚀方向绘制坡面线,理论上坡面线垂直等高线。基于 DEM 数据,以坡面线上点距切沟沟头点的距离为横轴,其高程为纵轴,在直角坐标系下拟合直线的斜率为该坡面线坡度,即沟头上方坡度。

汇水面积计算:利用 DEM 数据在 ArcGIS 10.5 软件平台计算流量,捕捉倾泻点后利用分水岭工具确定沟头点之上的汇流区域,将汇流区域转为矢量要素对照 DOM 和等高线进行边界修正,修正后的

汇流区域即为沟头上方汇水面积。

#### 1.4 S-A 临界模型

S-A 临界模型的主要原理是,地表径流对土壤的剪切力主要受坡面坡度和汇水面积共同影响<sup>[34]</sup>,一个小流域内土壤抗蚀力相似,坡度越大,地表径流侵蚀能越大,产生切沟所需要的汇水面积越小,反之亦然<sup>[24]</sup>。该临界模型中坡度与汇水面积的函数关系为:

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

式中, $S$  为沟头上方坡度( $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ); $A$  为沟头上方汇水面积( $\text{m}^2$ ); $a$  为切沟发生的临界常数,受当地的降雨、植被、土壤及土地利用类型等外界因素影响; $b$  大小等于双对数坐标系中临界线斜率的负值<sup>[35]</sup>,有研究<sup>[12]</sup>认为  $b$  值表达了汇水面积在 S-A 临界模型中的重要性。

S-A 临界模型以汇水面积为横轴,以沟头上方坡度为纵轴。采用下限值法构建 S-A 临界模型,其基本步骤为:(1) 计算得到切沟沟头上方坡度和汇水面积,以沟头上方汇水面积为自变量,沟头上方坡度为因变量,在双对数坐标系中得到坡度与汇水面积关系散点图。(2) 为保证临界条件的合理性,剔除异常极值点后在双对数坐标系中选取切沟沟头点群底部的两下限点连线作为临界线,确保所有其他点都在临界线上方。当下两限点选择不唯一时,选择与点群整体趋势线斜率更接近的两个下限点连接线作为临界线;(3) 双对数坐标系下临界线的截距为  $a$  值,斜率的负值为  $b$ ,求出  $a$  和  $b$  值,进而得到流域内切沟发生的地形临界公式<sup>[35]</sup>。在双对数坐标系下,当切沟沟头点的位置在临界线之上,即当  $S \times A^b \geq a$  时,切沟侵蚀发生,沟头形成;反之则表示不易发生切沟侵蚀。本研究基于岔巴沟流域高分辨

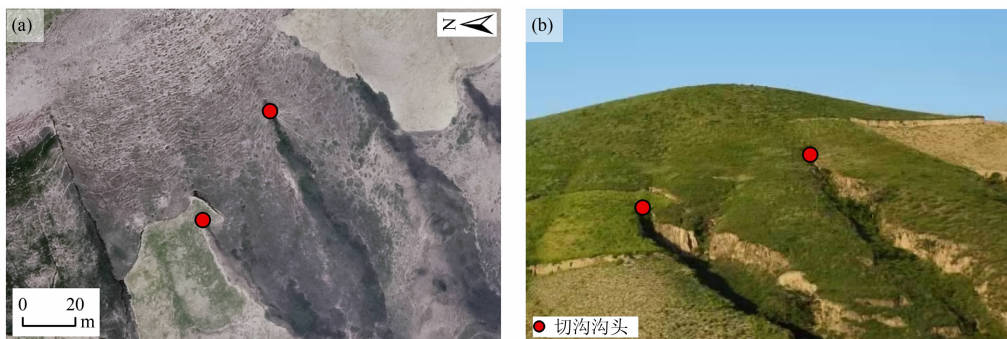


图 2 典型切沟沟头示意图:(a) 无人机影像;(b) 切沟实地照片

Fig. 2 Illustration of typical gully heads: (a) UAV image of typical gullies; (b) field photos of typical gullies



率 DOM 和 DEM 数据,并结合野外实地测量 GNSS RTK 沟头点位置,计算获取上、中和下游共 345 个坡面切沟沟头上方的坡度和汇水面积,构建 S-A 临界模型。

2 结果与分析

2.1 切沟沟头坡度和汇水面积分析

从表 3 可以看出,切沟沟头坡度从上游向下游递增,而汇水面积则递减。流域上、中、下游切沟沟头坡度范围分别为 14°~38°、15°~38°和 14°~41°,下游坡度分布范围较大。上、中、下游坡度平均值分别为 23.90°、25.17°和 26.57°,上游的坡度均值最小,下游最大。流域中游切沟沟头汇水面积分布范围最大,下游分布范围最小,上、中、下游汇水面积均值分别是 749.98 m<sup>2</sup>、588.05 m<sup>2</sup> 和 480.04 m<sup>2</sup>,上游均值最大,下游最小。

如图 3 所示,研究区内切沟沟头汇水面积主要集中的范围为 300~700 m<sup>2</sup>,不同流域位置汇水面积均值由大到小依次为上游、中游、下游。上游箱体较长,说明上游切沟沟头汇水面积数值范围较分散,上、中、下游汇水面积有显著差异,上游与下游差异达到极显著水平(图 3a)。岔巴沟流域切沟沟头坡度主要集中的范围为 20°~25°,与切沟沟头汇水面积在上、中、下游的变化规律相反。上、中、下游切沟沟头坡度差异显著,尤其是上游与下游差异达到极显著水平(图 3b)。

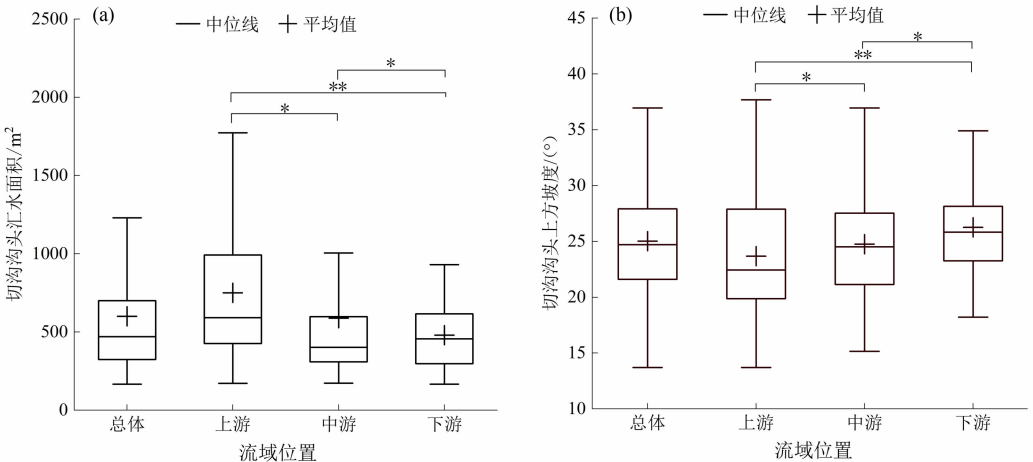
2.2 切沟沟头 S-A 临界模型

岔巴沟流域及其上、中、下游典型小流域切沟 S-A 关系(图 4)表明,切沟沟头坡度和汇水面积在 S-A 双对数坐标下呈负相关,岔巴沟流域典型小流域切沟 S-A 临界模型为  $S = 1.006A^{-0.197}$ ,上、中、下游分别为  $S = 1.006 A^{-0.197}$ 、 $S = 1.128 A^{-0.203}$  和  $S = 1.157A^{-0.209}$ 。岔巴沟流域切沟 S-A 临界模型中

表 3 上、中、下游典型小流域切沟沟头坡度与汇水面积

Tab.3 Slope gradient and drainage area of gully heads in typical watersheds at upstream, midstream, and downstream

位置	沟条数/条	坡度/(°)			汇水面积/m <sup>2</sup>		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
上游	101	13.71	37.69	23.90	171.73	2098.43	749.98
中游	129	15.11	38.31	25.17	173.22	2848.39	588.05
下游	115	13.50	41.67	26.57	165.97	1347.68	480.04
合计	345	13.50	41.67	25.21	165.97	2848.39	606.02



\* 表明两者有显著差异( $P < 0.05$ ); \*\* 表明两者有极显著差异( $P < 0.01$ )。

图 3 上、中、下游典型小流域切沟沟头汇水面积与坡度箱型图:(a) 汇水面积;(b) 坡度

Fig.3 Boxplots of drainage area and slope gradient of gully heads in typical watersheds at upstream, midstream, and downstream: (a) drainage area; (b) slope gradient

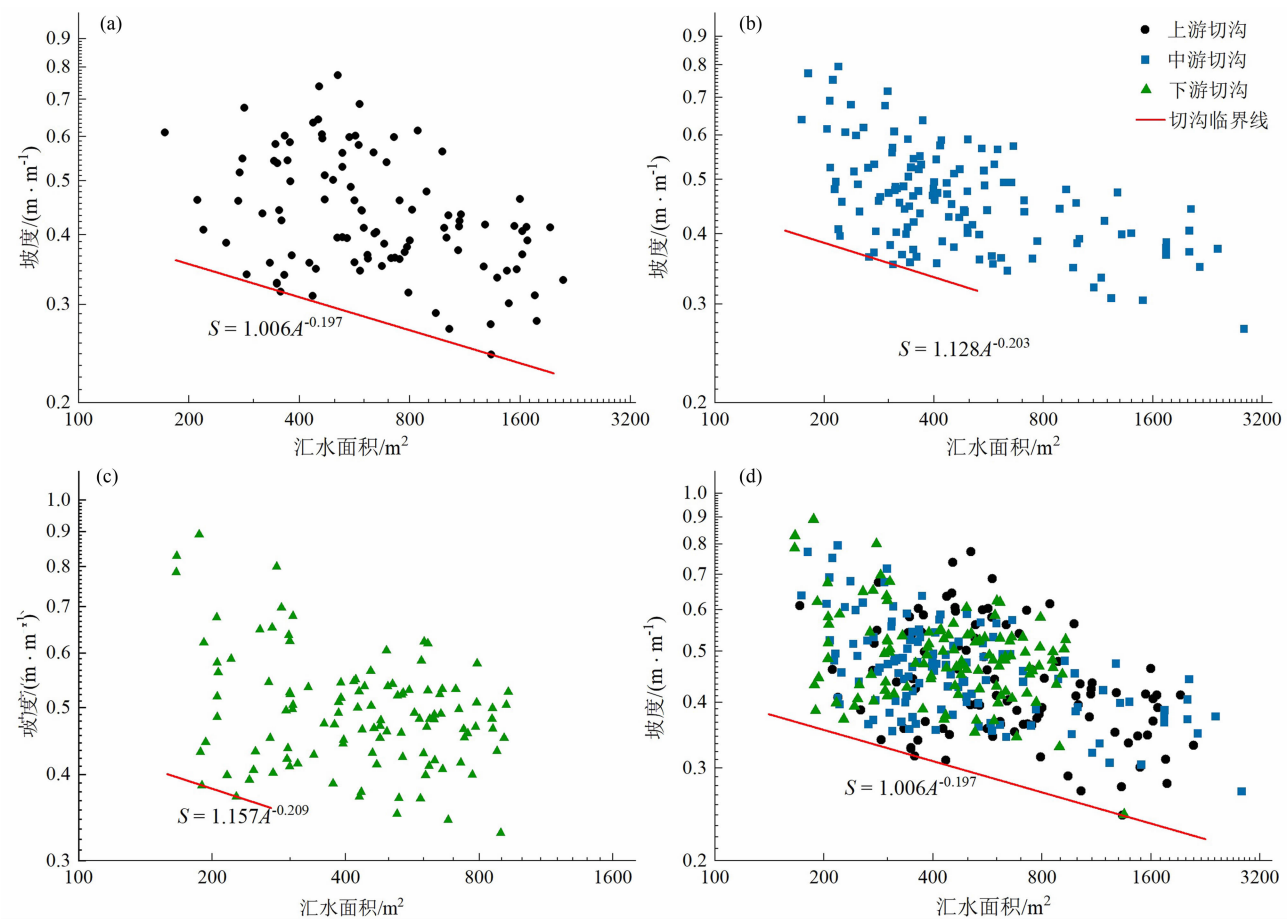


图4 典型小流域切沟 S-A 关系图:

(a) 上游;(b) 中游;(c) 下游;(d) 岔巴沟流域

Fig. 4 Slope-area relationships of gullies within typical watershed;

(a) upstream; (b) midstream; (c) downstream; (d) the Chabagou valley

临界常数  $a$  存在规律性差异,表现为上游最小,中游次之,下游最大;指数  $b$  在上、中、下游呈微小的递增趋势,但无明显差异。

2.3 不同土地利用类型切沟 S-A 临界模型

将 345 条坡面切沟按其所在坡面的土地利用类型进行分组,分析不同土地利用类型条件下切沟 S-A 临界模型参数分异性规律。本研究区上游 101 条切沟中,所在坡面土地利用类型草地占比较多,其余为坡耕地;中游 129 条切沟所在坡面土地利用类型坡耕地较少,草地占主要部分;下游 115 条切沟所在坡面以草地为主,坡耕地占比较小,但存在少量林地(表 4)。研究涉及的切沟中,草地切沟数目较多,林地切沟数目最少,坡耕地切沟多集中于上游。

如图 5 所示,不同土地利用类型的切沟 S-A 临界模型存在差异,坡耕地切沟 S-A 临界模型为  $S=0.810A^{-0.159}$ ,林草地切沟 S-A 临界模型为

表 4 岔巴沟流域典型小流域切沟所在坡面主要土地利用类型

Tab. 4 Primary land use types for hillslopes of gullies in typical watersheds within the Chabagou valley

位置	切沟数量/条	切沟所在坡面土地利用占比/%		
		坡耕地	草地	林地
上游	101	33	67	0
中游	129	6	94	0
下游	115	11	80	9
汇总	345	16	81	3

$S=2.007A^{-0.314}$ 。林草地切沟 S-A 临界模型临界常数  $a$  值是坡耕地的近 2.5 倍;指数  $b$  值是坡耕地的近 2 倍。相较于林草地,坡耕地发生切沟需要的临界剪切力更小,切沟更容易发生;而林草地发生切沟

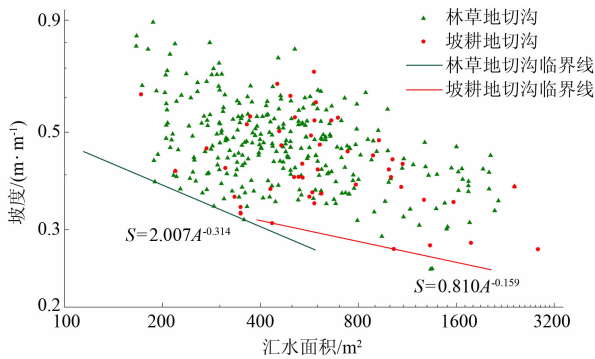


图 5 不同土地利用类型切沟沟头 S-A 关系  
Fig. 5 Slope-area relationships at gully heads for different land use types

的汇水面积因子重要性比坡耕地更高。

### 3 讨论

本研究的目的是探究流域尺度切沟 S-A 临界模型及其不同土地利用下的参数差异,研究假设是 S-A 临界模型参数在流域内有差异性,并受土地利用类型影响,研究证实了这一假设并给出了定量结果。

#### 3.1 切沟沟头 S-A 临界模型及参数的物理意义

切沟沟头 S-A 临界模型的差异性主要由模型参数的变异性决定。模型中系数  $a$  为切沟沟头发生的临界常数,是土壤抵御切沟侵蚀的阻力特征,受土地利用类型、土壤抗蚀性、植被及降雨等多种因素影响<sup>[15, 36]</sup>。黄土丘陵沟壑区切沟临界常数  $a$  值的范围一般为 1 ~ 2<sup>[29, 37]</sup>,本研究结果岔巴沟 9 个典型小流域  $a$  值均在此范围内。 $a$  值越大说明产生切沟沟头所需要的临界剪切力更大,越不容易发生切沟<sup>[27]</sup>,反之亦然。对指数  $b$  的物理意义解释主要有两种:一种是表示汇水面积在 S-A 临界模型中相对重要性<sup>[9, 12, 24]</sup>,另一种是相对剪切力指数<sup>[35]</sup>,与切沟发育机制有关,当切沟发育主要过程为地表径流时, $b$  值一般大于 0.2,当地下径流及沟体崩塌为主要过程时, $b$  值一般小于 0.2<sup>[19, 22]</sup>。以上对指数  $b$  物理意义的解释并不矛盾,前者从 S-A 临界模型表达式出发,后者注重侵蚀机制差异,理论上汇水面积对地表径流为主要驱动的切沟发育过程影响更大。有研究<sup>[15]</sup>认为指数  $b$  值可以用一个固定的常数表示,但更多的研究包括本研究均未能支持这一结论。

本研究中 9 个典型小流域  $b$  值均约为 0.2,可以推断在黄土丘陵沟壑区切沟发育过程整体上是地表径流和沟体崩塌等过程的复合。

#### 3.2 不同土地利用下 S-A 临界模型参数差异

本研究表明,总体上林草地模型临界常数  $a$  值大于坡耕地,前者是后者的近 2.5 倍。已有研究<sup>[12, 15]</sup>也有较为一致的认识。不同土地利用类型植被的冠幅和根系影响了土壤抗蚀性和切沟发育过程,进而影响切沟 S-A 临界模型参数<sup>[38]</sup>。植被对降雨的拦截能力随植被覆盖度增大而增强,可减小雨滴击溅动能进而使溅蚀强度降低,另一方面也增加了降雨入渗时间,延缓了径流汇聚过程,减小了径流冲刷能力<sup>[39]</sup>。根系能有效固土并增大土壤孔隙率,增强土壤水分入渗能力<sup>[40-41]</sup>。以上作用都提升了土壤抗蚀性,从而增大了模型临界常数  $a$  值。本研究在陕西子洲岔巴沟 9 个小流域总体的模型临界常数  $a$  为 1.006,与已有研究<sup>[30]</sup>中相同流域结果相近;在同属黄土丘陵沟壑区第 I 副区的陕西绥德桥沟<sup>[23]</sup>临界常数  $a$  为 1.654,略大于本研究结果,原因可能是桥沟流域为退耕还林典型小流域,坡耕地占比相比岔巴沟流域低,林草地占比更大,也再次印证了土地利用类型对模型临界常数  $a$  值的影响规律;本研究岔巴沟流域上、中、下游典型小流域临界常数  $a$  呈轻微递增趋势,土地利用的差异也是其中一个重要原因,3 个上游小流域中占总数量 33% 的切沟位于坡耕地,而中游和下游这一比例仅为 6% 和 11%,较大的耕地切沟比例使得上游临界常数  $a$  最小。下游比中游临界常数  $a$  大,但下游 3 个小流域内林地切沟占到了 9%,中游以草地切沟为主,这在一定程度说明林地相比草地可能具有更好的沟蚀阻控效应。

S-A 临界模型指数  $b$  也受土地利用类型的影响,本研究中林草地切沟的模型指数  $b$  值是坡耕地的近 2 倍。已有研究在区域尺度对比认为  $b$  值基本不受土地利用类型影响<sup>[15]</sup>,这可能与统计的空间尺度有关。本研究在同一流域内对比坡耕地和林草地切沟临界模型  $b$  值差异可以最大限度地减少土壤、气候等其他因素的影响。林草地切沟临界模型  $b$  值大于坡耕地的可能原因是在黄土高原林草地切沟发育主要受地表径流影响,而相比林草地,坡耕地沟头沟壁坍塌等重力侵蚀过程对切沟发育过程起了相对重要的作用。

土地利用类型对于切沟沟头地形临界条件的影响是复杂的。由图 5 可见,坡耕地和林草地切沟的 S-A 临界模型  $b$  值不同,临界线斜率不同,就会存在坡耕地和林草地切沟沟头临界线的交点,交点左右两侧土地利用类型对切沟形成地形临界条件的影响主要控制过程不同。交点左侧坡耕地相比林草地切沟发生的地形临界值更低,这与植被对径流流速的削减从而减小径流能量并增加入渗有关<sup>[42]</sup>,也符合黄土高原土地利用类型对切沟沟头地形临界影响的一般性规律;然而当汇水面积进一步增加时,水流含沙量增加,此时含沙量增加导致的水流流速、水流剪切力降低<sup>[43-44]</sup>成为影响切沟沟头地形临界的重要因素。因此,在图 5 坡耕地与林草地切沟沟头地形临界线交点右侧,由于林草地含沙量的减小<sup>[45]</sup>,坡耕地含沙量相对更大,在高含沙量影响下,切沟反而需要更高的地形阈值才能形成。以上解释的推断还需要进一步深入研究证明和量化。

### 3.3 结果适用性及未来研究展望

切沟 S-A 临界模型参数及其不同土地利用下的参数差异研究是该模型能够在实践中指导沟蚀治理的关键。实际中临界常数  $a$  可能受其他因素,如气候、土壤、管理措施等共同影响,未来需要集成更多的研究结果在更多的地区继续探索这一规律。本研究结果并不一定适用于梯田或道路等人为影响下的切沟,梯田等局地条件影响下的切沟汇水路径与自然坡面有较大差异<sup>[46]</sup>,其精确模拟需要以更高精度的局地地形变化影响下的水文模拟为基础。有研究<sup>[47]</sup>尝试针对上述问题进行了探索,但这方面的研究仍需进一步深化。

本研究以高精度的野外实测和无人机航摄数据为基础,探究了流域尺度黄土丘陵沟壑区切沟 S-A 临界模型及其在不同土地利用下的参数差异。研究结果将促进 S-A 临界模型在黄土高原沟道侵蚀治理中的应用,支持新时期黄土高原水土流失精准防控。

## 4 结论

(1)在黄土高原丘陵沟壑区岔巴沟流域内,切沟沟头坡度从流域上游向下游呈递增趋势,而汇水面积呈递减趋势。

(2)切沟沟头坡度和汇水面积在 S-A 双对数坐标下呈负相关;流域上、中、下游黄土切沟 S-A 临界

模型参数存在差异, S-A 临界模型分别为  $S = 1.006A^{-0.197}$ 、 $S = 1.128A^{-0.203}$  和  $S = 1.157A^{-0.209}$ , S-A 临界模型临界常数  $a$  和指数  $b$  从上游到下游都呈微小的递增趋势。

(3)S-A 临界模型临界常数  $a$  和指数  $b$  受土地利用的影响,坡耕地切沟 S-A 临界模型为  $S = 0.810A^{-0.159}$ ,林草地切沟 S-A 临界公式为  $S = 2.007A^{-0.314}$ ,林草地切沟模型临界常数  $a$  和指数  $b$  分别为坡耕地的近 2.5 倍和近 2 倍。

## 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): 11 - 15. [ZHU Xianmo. Comprehensive management of Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1980(2): 11 - 15] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.1980.02.001
- [2] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99 - 115. [ZHU Xianmo. Classification on the soil erosion in the loess region [J]. Acta Pedologica Sinica, 1956, 4(2): 99 - 115]
- [3] 刘元保, 朱显谟, 周佩华, 等. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988, 7(1): 9 - 18. [LIU Yuanbao, ZHU Xianmo, ZHOU Peihua, et al. The laws of hillslope channel erosion occurrence and development on Loess Plateau [J]. Memoir of NISWC, Academia Sinica, 1988, 7(1): 9 - 18]
- [4] 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. [WU Yongqiu, LIU Baoyuan. Gully, gully erosion and prediction [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2000, 8(2): 134 - 142] DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2000.02.004
- [5] 罗来兴. 划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J]. 地理学报, 1956, 22(3): 201 - 222. [LUO Laixing. A tentative classification of landforms in the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 1956, 22(3): 201 - 222] DOI: 10.11821/xb195603002
- [6] 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] DOI: 10.16843/j.sswc.2018.01.002
- [7] 杨丽娟, 王春梅, 张春妹, 等. 基于遥感影像研究极端暴雨条件下新成切沟发生发展规律[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 96 - 104. [YANG Lijuan, WANG Chunmei, ZHANG Chunmei, et al. Occurrence and development of newly formed gullies under extreme rainstorm conditions using remote sensing images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(6): 96 - 104] DOI: 10.11975/j.issn.



- 1002-6819.2022.06.011
- [8] 刘晓冰, 张兴义. 沟道侵蚀的多样性和发生过程及研究展望[J]. 土壤与作物, 2018, **7**(2): 90-102. [LIU Xiaobing, ZHANG Xingyi. Gully erosion: Diversity, processes and prospects [J]. Soils and Crops, 2018, **7**(2): 90-102] DOI: 10.11689/j.issn.2095-2961.2018.02.001
- [9] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(5): 1-13. [ZHANG Guanghui. Advances and prospects for gully erosion researches [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(5): 1-13] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.05.001
- [10] 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. DOI: 10.1002/ldr.2976
- [11] VANMAERCKE M, POESEN J, VAN MELE B, et al. How fast do gully headcuts retreat? [J]. Earth-Science Reviews, 2016, **154**: 336-355. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.01.009
- [12] 张光辉, 杨扬, 符素华, 等. 切沟侵蚀预报研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2022, **37**(6): 551-562. [ZHANG Guanghui, YANG Yang, FU Suhua, et al. Advances and prospects of gully erosion prediction [J]. Advances in Earth Science, 2022, **37**(6): 551-562] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.032
- [13] POESEN J, NACHTERGAELE J, VERSTRAETEN G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs [J]. Catena, 2003, **50**(2-4): 91-133. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00143-1
- [14] POESEN J W A, TORRI D B, VANWALLEGHEM T. Gully erosion: Procedures to adopt when modelling soil erosion in landscapes affected by gully erosion [J]. Handbook of Erosion Modelling, 2011, **4**(19): 360-386. DOI: 10.1002/9781444328455.ch19
- [15] 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. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.12.006
- [16] TANG Jie, XIE Yun, LIU Chuan, et al. Effects of rainfall characteristics and contour tillage on ephemeral gully development in a field in northeastern China [J]. Soil and Tillage Research, 2022, **218**: 105312. DOI: 10.1016/j.still.2021.105312
- [17] 胡刚, 伍永秋. 发生沟蚀(切沟)的地貌临界研究综述[J]. 山地学报, 2005, **23**(5): 565-570. [HU Gang, WU Yongqiu. Progress in the study of geomorphic threshold theory in channel (gully) erosion [J]. Mountain Research, 2005, **23**(5): 565-570] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2005.05.008
- [18] 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): 4449-4454. [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): 4449-4454] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2006.04.449
- [19] VANDEKERCKHOVE L, POESEN J, WIJDENES D O, et al. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, **25**(11): 1201-1220. DOI: 10.1002/1096-9837(200010)25:11<1201::aid-esp131>3.0.co;2-1
- [20] MORGAN R P C, MNGOMEZULU D. Threshold conditions for initiation of valley-side gullies in the Middle Veld of Swaziland [J]. Catena, 2003, **50**(2-4): 401-414. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00129-7
- [21] VERACHTERT E, VAN DEN ECKHAUT M, POESEN J, et al. Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium [J]. Geomorphology, 2010, **118**(3): 339-348. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.02.001
- [22] 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] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2008.05.016
- [23] CHENG Hong, ZOU Xueyong, WU Yongqiu, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China [J]. Soil and Tillage Research, 2007, **94**(1): 4-14. DOI: 10.1016/j.still.2006.06.007
- [24] 刘欣, 王春梅, 庞国伟, 等. 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[J]. 山地学报, 2020, **38**(5): 658-67. [LIU Xin, WANG Chunmei, PANG Guowei, et al. Sensitive area simulation of ephemeral and permanent gullies based on slope-area relationship in the loess region [J]. Mountain Research, 2020, **38**(5): 658-667] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000543
- [25] DUBE H B, MUTEWA M, MUCHAONYERWA P, et al. A global analysis of the morphology of linear erosion features [J]. Catena, 2020, **190**(2): 104542. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104542
- [26] VANMAERCKE M, PANAGOS P, VANWALLEGHEM T, et al. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art [J]. Earth-Science Reviews, 2021, **218**(6): 103637. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103637
- [27] LIU Xin, GUO Mingming, ZHANG Xingyi, et al. Morphological characteristics and volume estimation model of permanent gullies and topographic threshold of gully erosion in the rolling hilly Mollisols region of northeast China [J]. Catena, 2023, **231**(9): 107323. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107323
- [28] CHENG Hong, WU Yongqiu, ZOU Xueyong, et al. Study of

- ephemeral gully erosion in a small upland catchment on the Inner-Mongolian Plateau [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, **90**(1–2): 184–193. DOI: 10.1016/j.still.2005.09.006
- [29] GUAN Yabing, YANG Shengtian, ZHAO Changsen, et al. Monitoring long-term gully erosion and topographic thresholds in the marginal zone of the Chinese Loess Plateau [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **205**: 104800. DOI: 10.1016/j.still.2020.104800
- [30] 刘欣. 基于地形指标的黄土高原坡面侵蚀沟发生与空间分异研究[D]. 西安: 西北大学, 2021: 1–69. [LIU Xin. Research on occurrence and spatial differentiation of hillslope erosion gullies based on topographic indexes in Loess Plateau [D]. Xi'an: Northwest University, 2021: 1–69] DOI: 10.27405/d.cnki.gxbdu.2021.001838
- [31] 刘元保. 黄土高原坡面沟蚀的危害及其发生发展规律[D]. 杨凌: 中国科学院西北水土保持研究所, 1984: 1–89. [LIU Yuanbao. Harm and developmental patterns of gully erosion on Loess Plateau slopes [D]. Yangling: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, 1984: 1–89]
- [32] ZHANG Chunmei, WANG Chunmei, LONG Yongqing, et al. Comparative analysis of gully morphology extraction suitability using unmanned aerial vehicle and google earth imagery [J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(17): 4302. DOI: 10.3390/rs15174302
- [33] 张春妹, 董亚维, 王春梅, 等. 黄河中游中等流域切沟空间分异规律研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, **40**(2): 358–371. [ZHANG Chunmei, DONG Yawei, WANG Chunmei, et al. Study on the spatial differentiation patterns of gullies in the middle scale watershed of the middle reaches of Yellow River [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, **40**(2): 358–371] DOI: 10.13254/j.jare.2022.0170
- [34] PATTON P C, SCHUMM S A. Gully erosion, Northwestern Colorado: A threshold phenomenon [J]. *Geology*, 1975, **3**(2): 88–90. DOI: 10.1130/0091–7613(1975)3<88:GENCAT>2.0.CO;2
- [35] 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): 127–133. [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): 127–133] DOI: 10.11975/j.issn.1002–6819.2019.18.016
- [36] LI Yong, MO Yaqi, ARE K S, et al. Sugarcane planting patterns control ephemeral gully erosion and associated nutrient losses: Evidence from hillslope observation [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2021, **309**(12): 107289. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107289
- [37] LIU Gang, ZHENG Fenli, WILSON G V, et al. Three decades of ephemeral gully erosion studies [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **212**(39–41): 105046. DOI: 10.1016/j.still.2021.105046
- [38] 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. DOI: 10.1002/ldr.2805
- [39] TORRI D, SANTI E, MARIGNANI M, et al. The recurring cycles of biancana badlands: Erosion, vegetation and human impact [J]. *Catena*, 2013, **106**(1): 22–30. DOI: 10.1016/j.catena.2012.07.001
- [40] LI Zhenwei, ZHANG Guanghui, GENG Ren, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China [J]. *Biosystems Engineering*, 2015, **129**(11): 248–257. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.11.002
- [41] POESEN J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, **43**(1): 64–84. DOI: 10.1002/esp.4250
- [42] 李勉, 姚文艺, 陈江南, 等. 草被覆盖下坡沟系统坡面流能量变化特征试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(5): 15–19. [LI Mian, YAO Wenyi, CHEN Jiangnan, et al. Experimental study on changeable characteristics of runoff energy in hillslope–gully slope erosion system with different grass coverage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, **19**(5): 15–19] DOI: 10.3321/j.issn:1009–2242.2005.05.004
- [43] 艾建卫, 高照良, 娄永才, 等. 含沙量对高陡边坡径流水动力学特性的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, **30**(4): 75–82. [AI Jianwei, GAO Zhao liang, LOU Yongcai, et al. Effects of sediment concentration on hydrodynamic characteristics of runoff on high and steep slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, **30**(4): 75–82] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.016
- [44] 罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流动力学特性研究进展[J]. *地理科学进展*, 2009, **28**(4): 567–574. [LUO Rongting, ZHANG Guanghui, CAO Ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow [J]. *Progress in Geography*, 2009, **28**(4): 567–574] DOI: 10.11820/dlkxjz.2009.04.012
- [45] 崔钦凯, 刘俊娥, 陈浩, 等. 草被覆盖、雨强和坡度对黄土坡面径流含沙量的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, **37**(5): 40–47. [CUI Qinkai, LIU Jun'e, CHEN Hao, et al. Influence of grass coverage, rain intensity and slope on sediment concentration of runoff on loess slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, **37**(5): 40–47] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.05.005
- [46] 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**(7): 107136. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107136
- [47] ZHAO Yiyang, ZHANG Yan, YUAN Mutian, et al. Estimation of initiation thresholds and soil loss from gully erosion on unpaved roads on China's Loess Plateau [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, **46**(9): 1713–1724. DOI: 10.1002/esp.5102

## Topographical Critical Model of Loess Gully Head and Its Parameter Determination in Different Land Use Contexts

SHEN Huazhen, WANG Chunmei<sup>\*</sup>, PANG Guowei,  
LONG Yongqing, WANG Lei, WANG Qiang, YANG Qinke

(*a. College of Urban and Environmental Sciences; b. Shaanxi Key Laboratory Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; c. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048, China*)

**Abstract:** Gully erosion is a primary form of land degradation in the Loess Plateau region. There is a certain topographic criticality to the occurrence of loess gully erosion at gully head. S-A (Slope-Area) critical model is a common method for simulating and predicting gully head development; however, the insufficient understanding in the spatial differentiation of the model parameters and improper parameter determining in different land use contexts inhibited the model from extensive application.

In this study, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photography combined with field survey was used to investigate the Chabagou valley, a typical loess hilly area in northern Shaanxi, China for examination of S-A critical model regarding the spatial differentiation of the model parameters and parameter determination in different land use contexts.

(1) The slope gradients at gully heads increased from upstream to downstream, while the drainage area of gully heads showed a decreasing trend.

(2) As the S-A critical model for the Chabagou valley, critical constant  $a$  were 1.006, 1.128, and 1.157 at gully heads in the upstream, midstream, and downstream of the valley, respectively, and correspondingly model exponent  $b$  were 0.197, 0.203, and 0.209, respectively. It was noticeable that both critical constant  $a$  and model exponent  $b$  values did not vary to a great extent, exhibiting a slight increasing trend from upstream to downstream, without significant spatial differentiation in model parameters at gully heads.

(3) S-A critical model parameters for gully heads was subject to land use types. It had 0.810, 2.007 for  $a$  and  $b$  in sloping farmland, respectively, and 0.159 and 0.341 for  $a$  and  $b$  in forest-grass land, respectively. The critical constant  $a$  for forest-grass land was nearly 2.5 times higher than that of sloping farmland, while the exponent  $b$  was nearly 2 times higher that of sloping cropland.

This study deepens the understanding of the topographic critical conditions for the occurrence of gully erosion in loess hilly gullies, and enhances the availability of S-A critical model in loess erosion management practice, and would effectively support the precise management of erosion on the Loess Plateau.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicle (UAV); gully; topographical criticality; land use; the Loess Plateau

(责任编辑 钟雨倩)