

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.01.020 CSTR:32310.14.stbcb.2026.01.020

张紫薇,张光辉,邢书昆,等.基于无人机的黄土丘陵沟壑区极端降雨条件下小流域道路切沟侵蚀模拟和特征[J].水土保持学报,2026,40(1):280-289.
ZHANG Ziwei, ZHANG Guanghui, XING Shukun, et al. UAV-based simulation and characteristics of road gully erosion in small watersheds under extreme rainfall conditions in loess hilly-gully region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):280-289.

基于无人机的黄土丘陵沟壑区极端降雨条件下 小流域道路切沟侵蚀模拟和特征

张紫薇¹, 张光辉^{1,2}, 邢书昆¹, 曾荣昌¹

(1.北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2.北京师范大学地表过程与
水土风沙灾害风险防控全国重点实验室, 北京 100875)

摘要: [目的] 基于无人机航拍影像构建可靠的道路切沟体积估算模型, 实现对黄土高原道路切沟体积快速、准确的监测与评估。 [方法] 以陕西省志丹县旦八镇2个典型小流域2024年8月8日极端降雨切沟调查数据, 建立不同类型道路切沟形态参数与体积间的经验模型, 进一步估算次暴雨道路切沟侵蚀特征。 [结果] 1) 切沟长度和表面积与切沟体积间呈显著幂函数关系, 但表面积更能准确估算切沟体积, 分类(土路、石子路和公路)构建表面积与切沟体积间经验模型显著提升切沟侵蚀估算精度。 2) 监测小流域石子路切沟数量最多(67%), 侵蚀量(638.60 t)显著大于土路(492.59 t)和公路(51.42 t)。但土路侵蚀模数最大(29 326.75 t/km²), 分别是石子路、公路的1.7、11.4倍。 3) 道路切沟受多种因素影响, 路面硬化和石子铺设显著降低侵蚀强度, 集水区面积和坡度对切沟侵蚀的影响因道路类型而异, 土路切沟的响应最显著($p < 0.001$)。 [结论] 未铺设道路侵蚀强度最大, 侵蚀程度为剧烈侵蚀, 是黄土丘陵沟壑区道路切沟侵蚀防控的重点所在, 对道路进行石子覆盖或硬化处理能够有效减少道路切沟的发育, 研究结果为黄土丘陵区道路建设和水土流失防治提供参考。

关键词: 黄土丘陵沟壑区; 气候变化; 道路侵蚀; 切沟; 无人机

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)01-0280-10

UAV-Based Simulation and Characteristics of Road Gully Erosion in Small Watersheds under Extreme Rainfall Conditions in Loess Hilly-Gully Region

ZHANG Ziwei¹, ZHANG Guanghui^{1,2}, XING Shukun¹, ZENG Rongchang¹

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Hazards Risk Governance, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] This study aims to establish a reliable road gully volume estimation model using unmanned aerial vehicle (UAV) imagery to enable rapid and accurate monitoring and assessment of road gullies on the Loess Plateau. [Methods] Based on survey data of road gullies induced by extreme rainfall on August 8th, 2024, from two typical small watersheds in Danba Town, Zhidan County, Shaanxi Province, empirical models were developed to relate morphological parameters of different types of road gullies to their volumes. Based on these models, the road gully erosion characteristics of the rainstorm event were further estimated. [Results] 1) Significant power-function relationships were identified between gully volume and both gully length and surface area, with surface area providing more accurate volume estimates. Notably, the construction of separate empirical models for surface area and volume relationships across road types (earthen, gravel, and paved) significantly improved the accuracy of gully erosion estimation. 2) In the monitored watersheds, gravel roads accounted for the highest number of gullies (67%), with erosion volume (638.60 t) significantly exceeding that of earthen roads (492.59 t) and paved roads (51.42 t). However, earthen roads had the highest erosion modulus (29 326.75 t/km²), which was 1.7 times and

收稿日期: 2025-06-09 修回日期: 2025-08-27 录用日期: 2025-09-25 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-17

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(42130701)

第一作者: 张紫薇(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: zhang_ziwei163@163.com

通信作者: 张光辉(1969—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

11.4 times that of gravel and paved roads, respectively. 3) Road gully erosion was influenced by multiple factors. Road surface hardening and gravel paving significantly reduced erosion intensity, while the effects of catchment area and slope on gully erosion varied by road type, with earthen road gullies showing the most significant response ($p < 0.001$). [Conclusion] Unpaved roads exhibit the highest erosion intensity, classified as severe erosion, representing the primary focus for road gully erosion control in the loess hilly-gully region. Gravel coverage or road surface hardening can effectively reduce the development of road gullies. The findings provide a reference for road construction and water and soil conservation in the loess hilly-gully region.

Keywords: loess hilly-gully region; climate change; road erosion; gully; unmanned aerial vehicle (UAV)

Received: 2025-06-09

Revised: 2025-08-27

Accepted: 2025-09-25

Online(www.cnki.net): 2025-10-17

道路是支撑工农业生产、资源开发和社会经济可持续发展的关键基础设施,但随着道路面积的持续增加和网络结构的进一步复杂化,流域景观的破碎化和空间异质性加剧^[1]。在全球气候变化背景下,黄土高原地区降雨量超过极端降雨阈值(27.4~89.1 mm)的降雨事件数量呈上升趋势^[2]。道路切沟侵蚀加剧,逐渐成为区域侵蚀泥沙的主要策源地。尽管道路面积小,但其侵蚀强度远大于坡耕地^[3-4],因而,研究道路侵蚀是小流域水土保持措施合理配置、实现区域水土资源高质量发展的关键所在。

极端降雨条件下,黄土区道路极易发生切沟侵蚀,切沟形成时间短、速度快^[5],对其快速、精准监测是评价道路切沟侵蚀的基础。现有研究^[6-7]主要通过实地调查对切沟进行全部或分层抽样测量,耗时长、成本高,且受实地环境的限制。同时,分层抽样也存在测量道路代表性不足的情况。近年来,随着遥感技术的快速发展和无人机的广泛应用,高分遥感影像和无人机航拍已成为切沟侵蚀调查的主流方法^[5,8]。然而,现有技术对切沟三维形态特征的精准监测仍然存在很大不确定性。因而基于高分遥感影像和无人机航拍的切沟二维形态特征,建立切沟长度、表面积与体积间的经验模型,是快速、准确监测切沟侵蚀的基础。国内外学者^[9-11]在不同区域开展大量研究发现,切沟长度与体积间存在显著幂函数关系^[12-13],用切沟表面积替代长度可显著提高切沟体积估算精度^[14-16]。但经验模型具有明显的区域依赖性,且已有研究集中在坡面或坡耕地,针对道路切沟侵蚀的经验模型较少,从而限制道路切沟侵蚀的快速调查与评价。

黄土高原剧烈的道路切沟侵蚀主要受降水特性、集水区面积与坡度、土壤性质和道路类型等因素影响。虽然黄土高原年降水量较低,但集中分布在夏季,且以短历时暴雨为主,是导致道路切沟侵蚀的关键因素^[17]。土壤以黄绵土为主,土质疏松,农业活动集中,车辆压实作用频繁,导致路面土壤体积质量

不均,降雨时径流容易在低洼处汇聚,导致切沟侵蚀强烈发育^[18]。集水区面积和坡度是影响切沟侵蚀的重要因素,随集水区面积增大,径流量增加,随坡度增大径流加快,径流侵蚀动力加剧,当其大于临界值时,切沟侵蚀发育^[5,19]。切沟侵蚀发育与道路类型密切相关,不同类型的道路其集水区面积、坡度大小、土壤抗蚀性能和植被生长状况截然不同,导致道路切沟侵蚀发育的动力阈值出现差异,同时,小流域内不同类型道路的数量和面积差异明显,使其道路切沟侵蚀的泥沙贡献差异显著。因而需根据道路类型构建切沟体积与其形态特征间的经验模型,为基于无人机道路切沟侵蚀调查与评价奠定理论基础。因此,研究选取黄土丘陵沟壑区典型小流域,在2024年8月8日降雨发生后,通过无人机航拍获得数字正射影像(digital orthophoto map, DOM),通过目视解译获取道路切沟形态参数,同时对部分道路切沟进行现场测量,构建不同类型道路切沟体积估算经验模型,为精准监测道路切沟侵蚀提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

在北洛河选取2024年8月8日暴雨中心附近的王湾小流域(36°40'~36°41'N, 108°29'~108°31'E)和马家沟小流域(36°38'~36°49'N, 108°27'~108°28'E),流域位于陕西省延安市志丹县旦八镇,地处黄土丘陵沟壑区腹地(图1),气候为中温带大陆性半干旱季风气候,年平均降水量400~500 mm,集中在7—9月,以短历时暴雨为主。多年平均降雨量为500 mm,年平均气温为8.8℃,蒸发能力>1 000 mm。流域位于黄土丘陵沟壑区第Ⅱ副区,地形破碎,沟壑纵横。土壤以黄绵土为主,粉粒体积分数>50%,土质疏松,抗蚀性能低下。植被以草本和灌木为主,乔木较少,主要为蒿类、柠条、沙棘等耐旱植物。研究区石油资源丰富,石油开发活动频繁。王湾小流域面积为3.04 km²,1999年实施退耕还林(草)工程,植被恢复

效果显著,耕地以梯田为主,面积为 0.10 km^2 。马家沟小流域面积为 3.75 km^2 ,土地利用类型以草地和耕地为主,梯田面积为 0.55 km^2 ,分布有少量坡耕地。

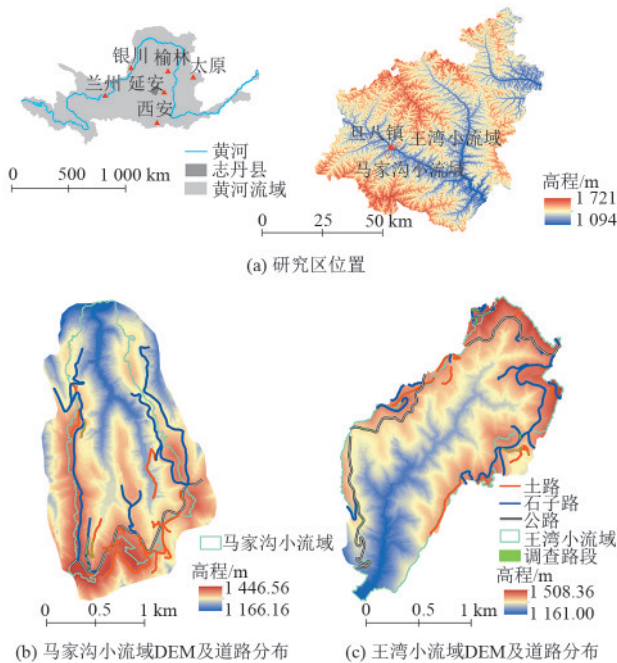


图1 研究区位置及小流域道路分布

Fig.1 Location of study area and road distribution in small watersheds

1.2 暴雨特征

2024年8月8—9日志丹县发生大暴雨,全县平均降雨量为 124.8 mm ,其中,位于暴雨中心的旦八镇降雨量高达 179.8 mm ,降雨历时为 18 h ,平均降雨强度为 9.99 mm/h ,是该镇自有降水监测以来的最大次降雨。降水从8日12:00开始,降雨强度较小,16:00—19:00出现第1次较小的降水峰值,累计降水量 3.6 mm ,提高表层土壤水分,为后续强降水条件下地表径流和切沟的发育创造了条件。从20:00开始降水强度快速增大,24:00达到最大值,最大降雨强度达到 47.3 mm/h 。随后降雨强度快速降低,9日2:00时降水强度为 10 mm/h ,至9日6:00时降水结束(图2)。

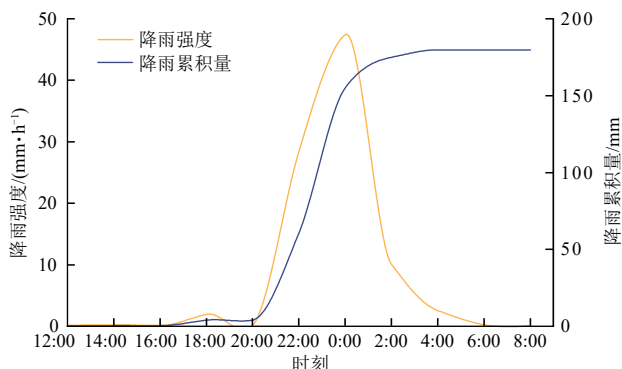


图2 2024年8月8日旦八镇降雨特征

Fig.2 Rainfall characteristics in Danba Town on August 8th, 2024

1.3 切沟侵蚀无人机监测

8月15—16日,利用搭载哈苏4/3 CMOS(2000万像素)的DJI Mavic 3 M无人机,在 100 m 飞行高度开展航拍,为确保点云和数字表面模型(digital surface model, DSM)质量,航向重叠率和旁向重叠率分别设置为 80% 和 70% 。使用Pix4 Dmapper 4.4.12软件,生成分辨率为 0.01 m 的DOM和DSM。对DSM图像进行NDVI分析并剔除地物,结合插值方法重建地表高程,生成 $0.1\text{ m}\times 0.1\text{ m}$ 分辨率的高精度数字高程模型(digital elevation model, DEM)。使用Arcmap10.8软件,对DOM影像进行目视解译,提取马家沟和王湾小流域道路和切沟信息。基于目视解译获得道路数据,得到各类道路的分布和长度(图1b和图1c),并随机测量各类道路的5个宽度,取平均值计算各类道路的面积。同时,对道路切沟进行解译,得到道路切沟的形态特征,计算其长度和表面积。道路切沟密度的计算公式为:

$$G_{DW} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{10^3 S_w} \quad (1)$$

式中: G_{DW} 为道路切沟密度, km/km^2 ; L_i 为目视解译出的切沟长度, m ; n 为切沟的数量; S_w 为流域面积, km^2 。

1.4 切沟形态特征测量及计算

受道路破坏的影响,暴雨发生后第5 d(8月14日)开始野外调查发现,小流域内道路可分为公路、石子路和土路3个类型(图3)。公路为水泥混凝土路面,主要用于大型车辆通行。石子路路面铺设石子,主要通往零星分布的油井。土路为未覆盖路面,供农用车辆及行人使用。结合道路切沟的代表性和可达性,在王湾小流域选择10条公路切沟,王湾和马家沟小流域选择16条石子路切沟和14条土路切沟,对其形态特征进行实地测量。具体方法为首先对切沟编号并定位,确定其经纬度坐标,拍摄切沟及周边景观照片,利用皮尺测量切沟长度,用钢卷尺或皮尺测量切沟宽度,利用手持式激光测距仪测定切沟深度。切沟宽度和深度测量在代表性断面上测量,对于长度不足 20 m 的切沟,根据测定的长度将切沟均分为5段,测量每个断面的宽度,依据5分法等间距测量5个深度(图4),将其平均视为该断面的切沟深度。对于长度超过 20 m 的切沟,每隔 5 m 测量1次断面宽度和深度,将所有断面的测量值平均即可得到切沟宽度和深度。使用激光测距仪确定坡度,对于较为平缓的切沟,每隔 10 m 测定1个坡度,对于较陡的切沟,每隔 5 m 测定1个坡度,将测定结果平均得到切沟的平均坡度。为计算切沟侵蚀量,选择土路和石

子路典型的样点测定土壤体积质量(重复3次),分别在10、20、40、70、90 cm 土层深度处用环刀取样,将土样带回实验室,在 105 °C 条件下烘干 24 h,称干重,计算得到土路、石子路的土壤体积质量分别为 1.52、1.60 g/cm³。由于无法挖掘公路土壤剖面,用石子路土壤体积质量作为公路土壤体积质量的替代值。切沟断面面积和体积计算方法为:

$$S_i = \frac{W_i}{6}(H1 + H2 + H3 + H4 + H5) \quad (2)$$

式中: S_i 为切沟第*i*个断面面积,m²; W_i 为切沟第*i*个断面宽度,m; $H1\sim H5$ 分别为切沟第*i*个断面从左至右5个测量点的深度,m。

$$V_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{3}(S_i + S_{i-1} + \sqrt{S_i \times S_{i-1}})l_i (S_0 = 0) \quad (3)$$

式中: V_i 为切沟体积,m³; S_{i-1} 为第*i*-1个切沟断面的面积,m²; l_i 为第*i*-1到*i*个切沟断面之间的距离,m。

$$A = \frac{10^6 V_i \rho}{L W} \quad (4)$$

式中: A 为不同类型道路的切沟侵蚀强度,t/km²; L 为不同类型道路总长度,m; W 为道路宽度,m; ρ 为土壤体积质量,g/cm³。

$$A_w = \frac{V_i \rho}{S_w} \quad (5)$$

式中: A_w 为流域内道路切沟侵蚀强度,t/km²。

1.5 数据统计与分析

利用 Arcmap10.8 水文分析工具确定切沟集水区面积,根据 DOM 和 DEM 影像数据对集水区面积进行校正。采用 IBM SPSS Statistics 25 软件拟合切沟长度、表面积与体积、坡度与分段体积及集水区面积和切沟面积与体积间的关系,利用决定性系数(R^2)和纳什效率系数(NSE)评价道路体积估算模型的模拟效果。

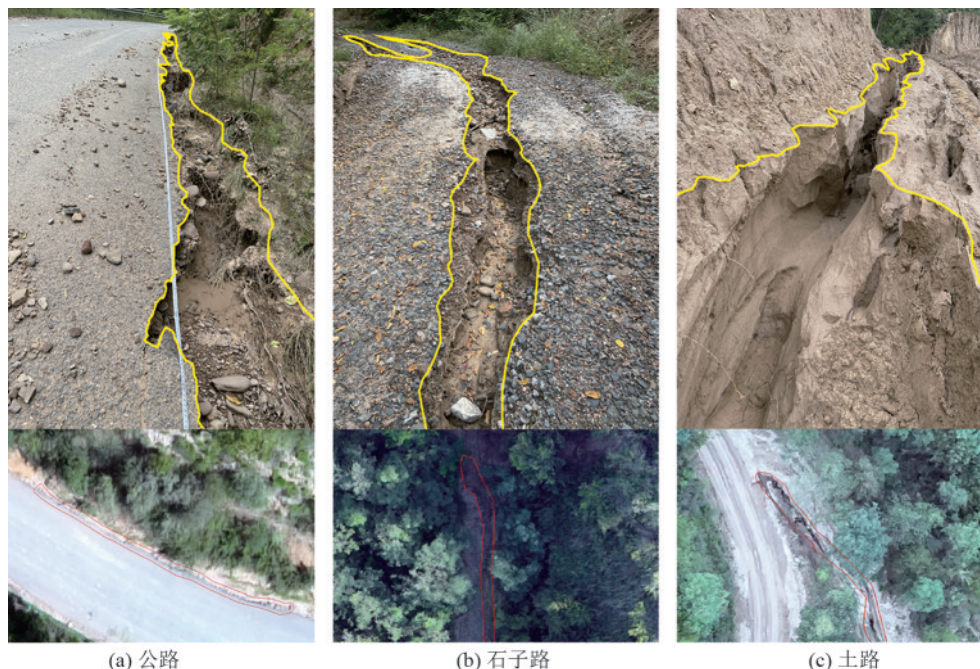


图 3 不同类型道路切沟实地照片与遥感影像对比

Fig.3 Comparison between field photos and remote sensing images of gullies on different road types

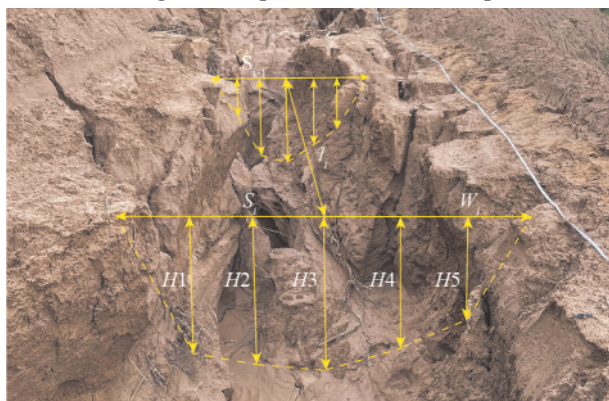


图 4 切沟形态特征测量示意

Fig.4 Schematic diagram of gully morphological measurements

2 结果与分析

2.1 道路切沟体积估算模型构建

将目视解译获得的切沟长度和表面积与实测切沟体积进行拟合(图5、图6)。整体而言,切沟长度和表面积与体积间呈显著幂函数关系,并且表面积与体积间的拟合关系优于长度与体积间的关系。对于3种道路类型而言,长度与体积呈幂函数关系为 $V = 0.026 L^{1.60} (R^2 = 0.75, NSE = 0.75)$,但不同道路类型的关系略有差异,土路为 $V = 0.023 L^{1.76} (R^2 = 0.91, NSE = 0.98)$,石子路为 $V = 0.052 L^{1.37} (R^2 = 0.58, NSE = 0.70)$,公路为 $V = 0.045 L^{1.28} (R^2 = 0.81, NSE =$

0.61)。对于3种道路类型,切沟表面积与体积间的幂函数关系为 $V=0.120 A^{1.23}$ ($R^2=0.91$, $NSE=0.89$)。将道路分为公路、石子路和土路后发现,拟合的幂函数关系得到明显改善,土路、石子路和公路分别为 $V=0.103S^{1.34}$ ($R^2=0.94$, $NSE=0.96$)、 $V=0.107 S^{1.18}$ ($R^2=0.93$, $NSE=0.94$)和 $V=0.168 S^{1.16}$ ($R^2=0.92$, $NSE=0.93$)。随着道路类型从土路变为石子

路和公路,幂指数从1.76分别下降到1.37、1.28(图5)。与此相似,表面积与体积拟合模型的幂指数也表现为土路>石子路>公路(图6),表明单位长度或面积土路切沟的深度更深、宽度更大,土壤侵蚀更加剧烈。回归方程的 R^2 和 NSE 表明,与切沟长度相比,利用切沟表面积可显著提高切沟体积估算精度。

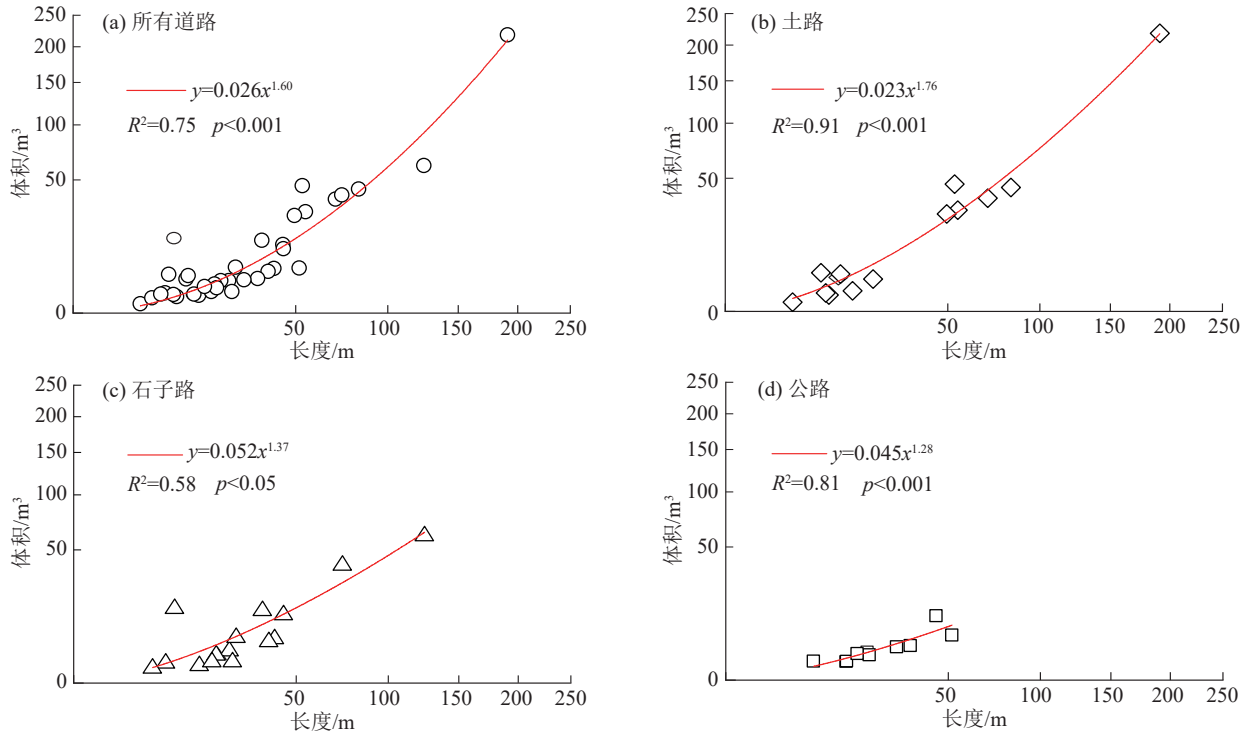


图5 切沟长度与体积的拟合关系

Fig.5 Fitting relationships between gully length and volume

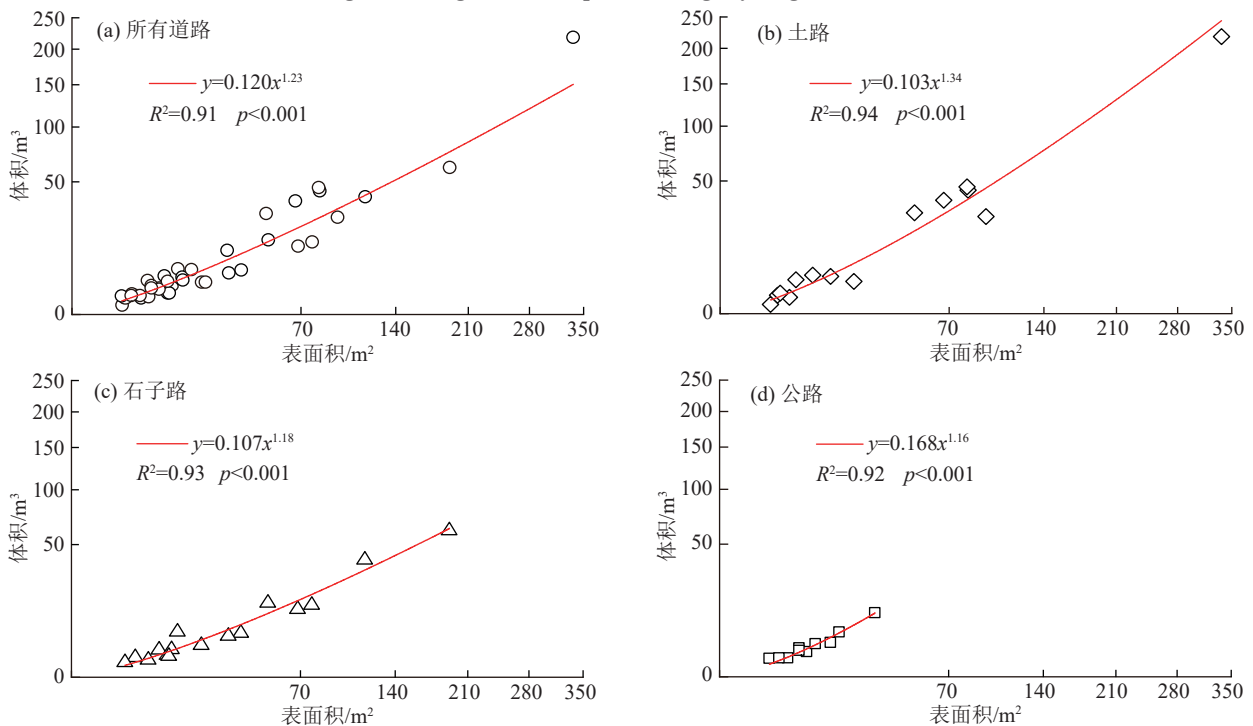


图6 切沟表面积与体积的拟合关系

Fig.6 Fitting relationships between gully surface area and volume

2.2 道路切沟发育特征及侵蚀量估算结果

基于无人机影像对马家沟和王湾 2 个小流域的道路切沟进行目视解译(图 7、表 1)表明,马家沟小流域共有道路切沟 151 条,其中土路 41 条,石子路 110 条,分别占总数的 27.2%、72.8%。王湾小流域共有道路切沟 52 条,其中土路 15 条(占 28.8%),石子路 27 条(占 51.9%),公路 10 条(占 19.2%)。从数量来看,马家沟小流域的道路切沟数量显著大于王湾小流域,是后者的 2.9 倍;从切沟发育类型来看,2 个小流域均以石子路切沟为主(马家沟 72.8%,王湾 51.9%),其次为土路切沟(马家沟 27.2%,王湾 28.8%)。2 个小流域道路切沟的形态特征比较相似,均表现为土路切沟平均长度和表面积大于石子路(表 1)。王湾小流域公路切沟的平均长度(25.66 m)接近土路(25.37 m),但其表面积明显偏小,其长度与表面积的不对应表明,公路切沟多呈狭长形态。土路切沟不仅长度长,而且表面积也大,充分说明土路切沟发育更加剧烈,对道路的毁坏更大。3 种道

路类型的切沟密度均 >7,属于剧烈侵蚀。相较于植被恢复较好的王湾小流域,马家沟小流域的土路切沟密度和石子路切沟密度均较大,分别是前者的 2.2、3.1 倍。对于小流域而言,马家沟小流域的道路切沟密度为 0.78 km/km²,是王湾小流域的 2.1 倍。

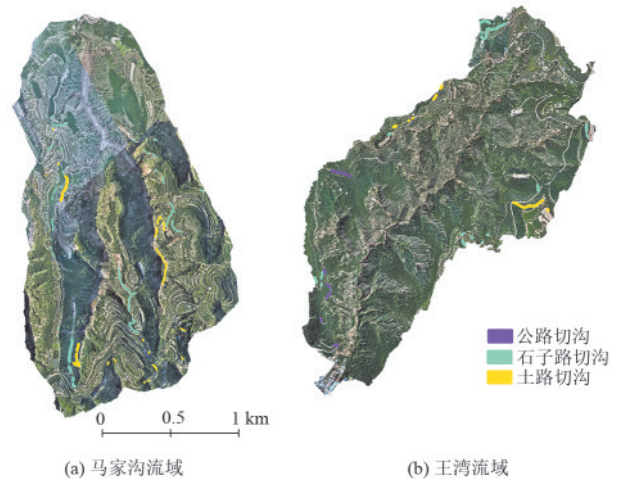


图 7 小流域道路切沟分布

Fig.7 Distribution of road gullies in small watersheds

表 1 道路切沟目视解译结果

Table 1 Visual interpretation results for road gullies

小流域	道路类型	切沟			道路			流域道路切沟密度/(km·km ⁻²)
		数量	平均长度(L)/m	平均表面积(A)/m ²	长度/km	平均宽度/m	面积/km ²	
马家沟	所有道路	151	19.29	14.75	15.16	3.80	0.09	0.78
	土路	41	25.50	25.95	7.73	4.64	0.04	0.28
	石子路	110	16.98	10.76	5.01	2.77	0.02	0.50
	公路	0	—	—	2.42	5.27	0.01	—
王湾	所有道路	52	21.46	17.44	12.94	4.36	0.06	0.38
	土路	15	25.37	21.34	5.72	4.45	0.03	0.13
	石子路	27	17.73	17.22	2.94	3.35	0.01	0.16
	公路	10	25.66	12.17	4.28	4.00	0.02	0.09

基于上述切沟表面积与体积间的估算模型,评价马家沟和王湾小流域道路侵蚀特征(表 2),表明不同小流域和道路类型的切沟侵蚀差异明显。马家沟小流域道路切沟侵蚀量为 1 693.94 t,是王湾小流域(619.85 t)的 2.73 倍。从道路类型看,马家沟小流域石子路和土路切沟侵蚀量分别为 896.67、797.27 t,而王湾小流域石子路、土路和公路切沟侵蚀量分别为 380.53、187.90、25.71 t。各类道路切沟中,石子路切沟侵蚀量最大,其次是土路,公路切沟侵蚀量则远小于前两者,表明在调查的小流域中石子路和土路是发生切沟侵蚀的主要道路类型。值得注意的是,虽然石子路的切沟侵蚀量最大,但其侵蚀模数明显小于土路。马家沟小流域土路和石子路切沟土壤侵蚀模数分别为 39 363.50、22 416.75 t/km²;王湾小流域

土路、石子路和公路切沟土壤侵蚀模数分别为 18 790.00、12 684.33、2 571.00 t/km²。按照水利部土壤侵蚀强度分级标准,马家沟小流域土路和石子路切沟侵蚀模数远大于 1.5 万 t/km²,均属于剧烈侵蚀。而王湾小流域土路为剧烈侵蚀,石子路为强烈侵蚀,公路为中度侵蚀。由此可知,尽管道路在流域中的面积占比有限,但切沟发育密度大、侵蚀程度高,危害严重。其中,土路是小流域切沟侵蚀的主要道路类型,其次是石子路,而公路的土壤侵蚀量相对较小。

2.3 道路切沟的影响因素

不同类型道路切沟集水区面积差异明显,平均集水区面积表现为石子路 > 土路 > 公路(表 3)。石子路和土路切沟的集水区面积接近,但均远大于公路,其集水区面积分别是公路的 2.05、1.85 倍。集水

区面积显著影响切沟侵蚀,随着集水区面积增大,切沟体积呈线性或幂函数增大(图 8),但其相关程度随着道路类型的不同而有所差异,土路切沟集水区面

积与体积呈显著的线性正相关($R^2=0.97$),其次为石子路($R^2=0.76$),而公路切沟集水区面积与体积间则表现为较弱的幂函数关系($R^2=0.41$)。

表 2 不同类型道路切沟侵蚀特征

Table 2 Gully erosion characteristics of different road types

小流域	道路类型	切沟			道路土壤侵蚀模数/ ($t \cdot km^{-2}$)	流域道路土壤侵蚀模数/ ($t \cdot km^{-2}$)
		体积/ m^3	土壤体积质量/ ($g \cdot cm^{-3}$)	土壤侵蚀量/t		
马家沟	所有道路	1 084.94	—	1 693.94	18 821.56	451.72
	石子路	560.42	1.60	896.67	22 416.75	239.11
	土路	524.52	1.52	797.27	39 863.50	212.61
	公路	—	—	—	—	—
王湾	所有道路	393.59	—	619.85	10 330.83	203.90
	石子路	237.83	1.60	380.53	12 684.33	125.17
	土路	123.62	1.52	187.90	18 790.00	61.81
	公路	32.14	1.60	51.42	2 571.00	16.91

表 3 不同类型道路切沟集水区面积和坡度

Table 3 Gully catchment area and slope gradient of different road types

道路类型	数量	集水区面积/ m^2	坡度/ $(^\circ)$
所有道路	40	1 065.02	9.44
土路	14	1 149.65	11.06
石子路	16	1 269.12	8.87
公路	10	619.99	7.20

不同类型道路的坡度存在差异(表 3),土路切沟的平均坡度最大,为 11.06° ,石子路为 8.87° ,公路最小(7.20°)。坡度是影响切沟侵蚀的重要因素,拟合道路切沟体积和坡度的关系发现,切沟体积随坡度的增大而增大(图 9),但其相关性明显弱于集水区面积与切沟体积间的关系,说明在本研究中集水区面积对道路切沟侵蚀的影响明显大于坡度,可能与不同类型道路坡度的差异较小有关。

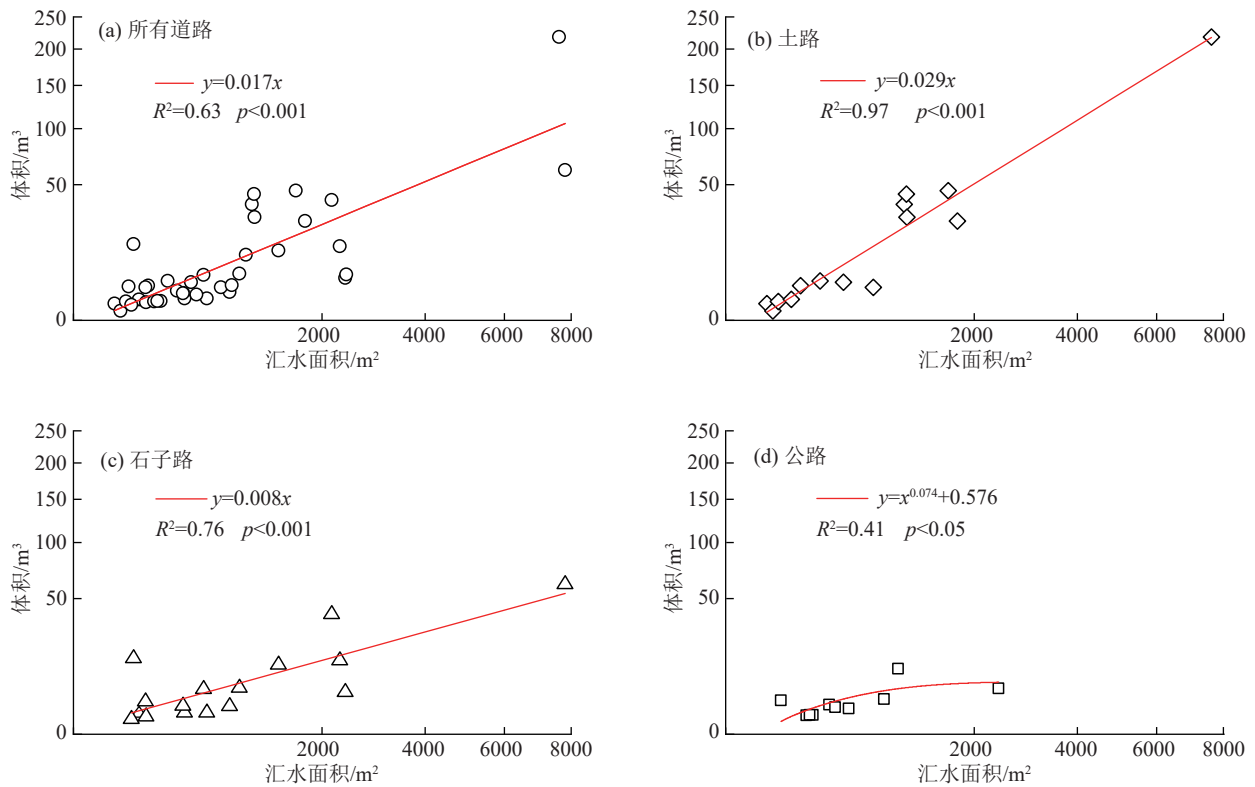


图 8 不同类型道路切沟集水区面积与体积的关系

Fig.8 Relationships between gully catchment area and volume of different road types

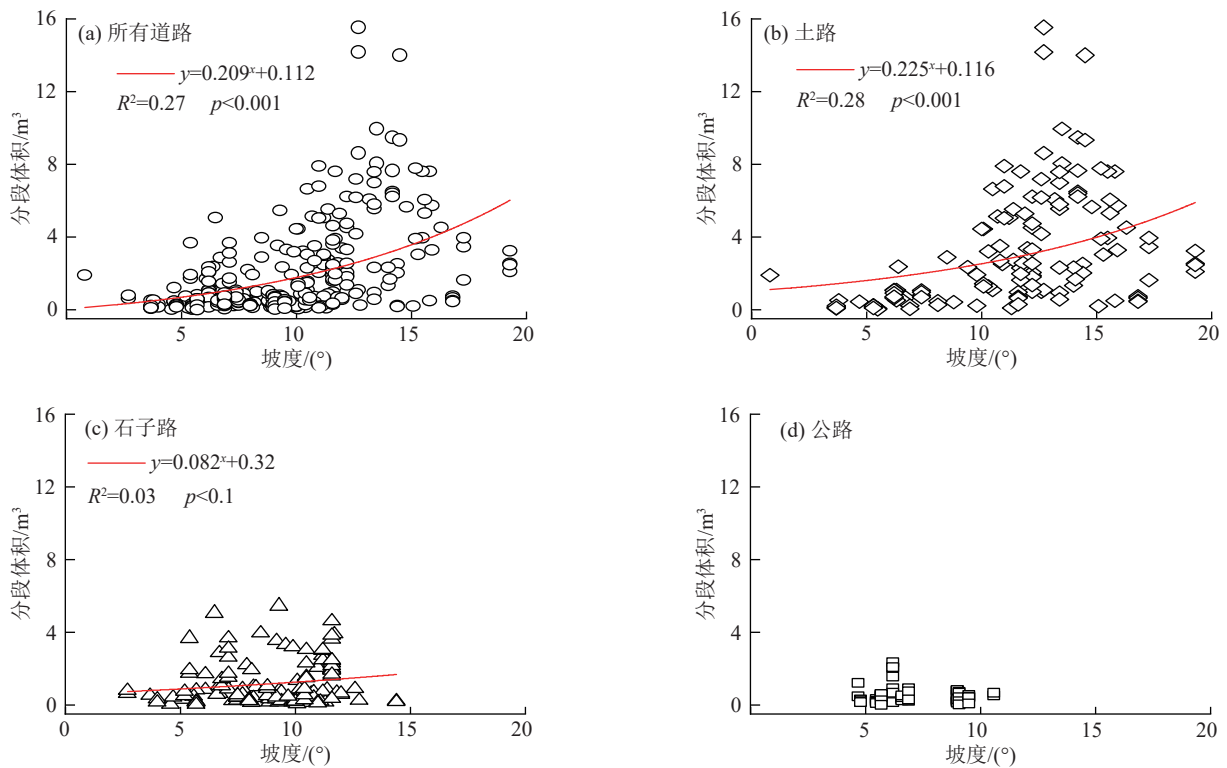


图 9 不同类型道路坡度与切沟体积的关系

Fig.9 Relationships between slope gradient and gully volume of different road types

3 讨论

3.1 不同道路切沟侵蚀估算模型对比

本文对比极端降雨条件下,切沟体积与长度模型和切沟体积与表面积模型对黄土高原小流域道路切沟体积的估算精度,表明切沟体积与表面积模型($V=aA^b$)的估算效果明显优于切沟体积与长度模型(图 6、图 7),与前人^[14-16]在其他区域坡耕地的研究结果相同。在相同的区域环境条件下,道路类型显著影响切沟体积与表面积间的经验关系,土路切沟的 b 值(1.34)明显大于石子路(1.18)和公路(1.16),表明土路切沟横截面积对表面积的变化更加敏感,切沟下切和沟岸扩张更为显著,切沟侵蚀更加严重^[20-21]。与其他区域研究^[9,16]结果相比,黄土高原道路切沟模型的 a 值与冀西北(0.127)和东北黑土区(0.156)的结果比较接近,但大于呼伦贝尔大草原(0.060),而小于晋西黄土区(1.710)的相关结果,该差异主要与土壤质地和地貌有关,呼伦贝尔大草原地形平坦,植被覆盖率高,而晋西黄土区土质相较于本文研究更加致密^[7,20]。石子路和公路切沟体积经验模型的 b 值小于大部分地区的研究结果,主要是因为石子路和公路土壤体积质量大,土壤致密,抗蚀性能强,因而在同等条件下切沟侵蚀发育较弱。

3.2 集水区面积和坡度对道路切沟侵蚀的影响

下垫面条件是导致不同类型道路切沟侵蚀差异

的关键,其通过调控道路土壤水入渗、产流、汇流和道路稳定性影响切沟侵蚀过程。公路路面硬化增强道路的抗蚀性能,从而降低切沟侵蚀风险。石子路路面覆盖砾石,既可有效降低降雨溅蚀,同时增大地表随机糙率,增加径流阻力,降低径流流速,从而显著降低径流的侵蚀动力^[22],抑制切沟侵蚀发育。土路表面基本无植被覆盖,夏季强降雨频发,路面处于反复侵蚀和填埋过程中,土壤结构松散^[23]。当雨强较小时,松散的土壤结构利于降水入渗,减少地表径流,但当雨强较大时,以超渗产流为主的产流机制导致地表径流强烈发育,为切沟侵蚀强烈发育创造必要的动力条件。同时,夏季农业活动频繁,车辆与农具的压实作用导致路面凹凸不平。降雨产流后,径流易在低洼处汇集,侵蚀动力增强,进而促进切沟发育^[24]。

道路及其网络结构显著改变径流集水区面积和汇流路径。在同样地形、土壤、土地利用和降水条件下,集水区面积越大,则径流量越大,径流剪切力越大,从而加剧切沟侵蚀^[25],因而集水区面积是影响切沟侵蚀的关键参数^[26]。与集水区面积类似,坡度也是影响切沟侵蚀的重要因素,随着坡度增大径流流速增大,导致径流动能增大,从而促进切沟的发育^[27-28]。公路建设有较为完整的排水系统,排水效率显著大于石子路和土路,可安全地疏导径流,降低切

沟侵蚀发生风险。而石子路和土路的建设标准低、投入少,路面坡度大,缺乏排水系统,因而在强降雨条件下切沟侵蚀强烈发育,也是公路切沟集水区面积与体积相关性明显弱于石子路和土路的关键所在(图8)。

3.3 小流域道路切沟侵蚀特征

根据本文建立的切沟体积与表面积模型,估算的大暴雨条件下马家沟小流域的侵蚀模数为 39 863.50 t/km²,王湾小流域的侵蚀模数为 18 790.00 t/km²,与 LIAO 等^[6]和 XU 等^[18]对黄土高原小流域暴雨条件下土路切沟侵蚀模数实测值相近,但显著小于 WANG 等^[29]在利奇马台风过境后监测的黄土高原土路的侵蚀模数(228 075 t/km²)和 YANG 等^[30]在子洲 7·26 特大暴雨后实测的土路土壤侵蚀模数(235 000 t/km²)。该差异与降水级别有关系,本文的降水等级明显小于利奇马台风和子洲 7·26 特大暴雨,因而较小的道路切沟侵蚀模数较易理解。

本研究发现,2 个小流域道路切沟侵蚀差异显著,马家沟小流域侵蚀模数是王湾小流域的 2.12 倍。2 个小流域距离 < 10 km,降水特性、地形条件、土壤性质等均较为相似,因而道路切沟侵蚀的显著差异与小流域土地利用密切相关。LI 等^[23]研究发现,耕地面积增加 1%,道路密度减少 0.7%,流域路面细沟侵蚀量增加 1.7%。黄土丘陵沟壑区以小地块为主,耕地面积增大必然导致地块边界减少,坡面异质性降低,坡面径流增加,加剧道路切沟侵蚀^[31]。马家沟小流域梯田面积占比为 15%,而王湾小流域植被恢复很好,梯田面积占比仅为 3%,也是马家沟切沟侵蚀模数显著大于王湾的重要因素之一。植被具有强大的水土保持功能,植被恢复促进土壤入渗,减少坡面径流、强化土壤抗蚀性能,从而有效抑制切沟侵蚀发育。

4 结论

1) 与传统的切沟长度相比,切沟表面积与体积的相关性更强,更能准确估算道路切沟侵蚀量,对道路进行分类构建 V-A 模型可显著提升道路切沟侵蚀量的估算精度。

2) 石子路和土路是黄土高原小流域切沟侵蚀发育的主要道路类型,侵蚀量占 84.3%。由于土路面积小,侵蚀模数高达 29 327 t/km²,显著高于石子路和公路。

3) 下垫面特征是影响道路切沟侵蚀的关键因素,集水区面积对切沟侵蚀的影响显著大于坡度,但影响程度随道路类型而异。土路是黄土丘陵沟壑区小流域切沟侵蚀强烈发育的主要道路类型。通过实施流域植被恢复、降低未铺设道路坡度、提高路面硬

化率及建设完善的排水系统,可有效抑制土路切沟侵蚀发育,显著降低黄土丘陵沟壑区小流域道路切沟侵蚀发生风险。

参考文献:

- [1] YANG S Q, JIN Z, HAO M K, et al. Landscape and soil erosion changes along different types of road over the past 30 years in the largest loess tableland of China[J]. Land Degradation and Development, 2024, 35(18): 5559-5569.
- [2] 张昕晗, 赵文婷, 焦菊英, 等. 1960—2023 年黄土高原极端降水事件时空演变特征[J]. 干旱区地理, 2025, 48(7): 1153-1166.
ZHANG X H, ZHAO W T, JIAO J Y, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of extreme precipitation events on the Loess Plateau from 1960 to 2023[J]. Arid Land Geography, 2025, 48(7): 1153-1166.
- [3] ZIEGLER A D, SUTHERLAND R A, GIAMBELLUCA T W. Runoff generation and sediment production on unpaved roads, footpaths and agricultural land surfaces in northern Thailand[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(5): 519-534.
- [4] GUO W Z, BAI Y, CUI Z Q, et al. The impact of concentrated flow and slope on unpaved loess-road erosion on the Chinese Loess Plateau[J]. Land Degradation and Development, 2021, 32(2): 914-925.
- [5] ZHAO Y Y, ZHANG Y, YUAN M T, 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.
- [6] LIAO R X, FU S H, WEI J M, et al. Annual soil erosion characteristics of unpaved roads in the Loess Plateau hilly and gully region, China[J]. Catena, 2024, 247: e108483.
- [7] 郭明明, 刘欣, 陈卓鑫, 等. 呼伦贝尔草原切沟形态发育特征与体积估算模型[J]. 农业工程学报, 2024, 40(14): 81-90.
GUO M M, LIU X, CHEN Z X, et al. Morphological characteristics and volume estimation model of the permanent gully in the Hulunbuir grassland of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(14): 81-90.
- [8] 李镇, 齐志国, 秦伟, 等. 利用高分立体影像构建东北黑土地丘陵沟壑区切沟体积估算模型[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 122-130.
LI Z, QI Z G, QIN W, et al. Gully volume estimation model using high-resolution satellite imaging in mountainous and hilly regions with black soil of northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 122-130.
- [9] 吴可, 李镇, 齐志国, 等. 冀西北间山盆地切沟体积估算模型[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(2): 39-46.
WU K, LI Z, QI Z G, et al. Estimation model for gully

- volume in the basin of northwest Hebei mountains[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(2):39-46.
- [10] FRANKL A, POESEN J, SCHOLIERS N, et al. Factors controlling the morphology and volume (V) -length (L) relations of permanent gullies in the northern Ethiopian Highlands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(14):1672-1684.
- [11] BROSENS L, CAMPFORTS B, GOVERS G, et al. Comparative analysis of the Copernicus, TanDEM-X, and UAV-SfM digital elevation models to estimate lavaka (gully) volumes and mobilization rates in the Lake Alaotra region (Madagascar) [J]. *Earth Surface Dynamics*, 2022, 10(2):209-227.
- [12] NACHTERGAELE J, POESEN J, STEEGEN A, et al. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils [J]. *Geomorphology*, 2001, 40(3/4):237-252.
- [13] KOMPANI-ZARE M, SOUFI M, HAMZEHZARGHANI H, et al. The effect of some watershed, soil characteristics and morphometric factors on the relationship between the gully volume and length in Fars Province, Iran [J]. *Catena*, 2011, 86(3):150-159.
- [14] YANG D, MU K, YANG H, et al. A study on prediction model of gully volume based on morphological features in the JINSHA dry-hot valley region of southwest China [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(5):e300.
- [15] LIZ, 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.
- [16] LIU X, GUO M M, ZHANG X Y, et al. Morphological characteristics and volume estimation model of permanent gullies and topographic threshold of gully in the rolling hilly mollisols region of northeast China [J]. *Catena*, 2023, 231:e107323.
- [17] TANG X, MIAO C Y, XI Y, et al. Analysis of precipitation characteristics on the Loess Plateau between 1965 and 2014, based on high-density gauge observations [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 213:264-274.
- [18] XU Q, LI M M, JIANG X H, et al. Response of rill erosion to rainfall types and maintenance on the Loess Plateau: Implications for road erosion control [J]. *Catena*, 2022, 219:e106642.
- [19] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度 [J]. *山地学报*, 2010, 28(4):415-421.
CHEN X A, CAI Q G, ZHANG L C, et al. Research on critical slope of soil erosion in a hilly loess region on the Loess Plateau [J]. *Mountain Research*, 2010, 28(4):415-421.
- [20] 李镇, 张岩, 尚国珪, 等. 晋西黄土区切沟断面特征及体积估算模型 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(6):152-159.
LI Z, ZHANG Y, SHANG G F, et al. Characterizing gully cross section and modelling gully volume in hilly loess region of western Shanxi Province [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(6):152-159.
- [21] ZHANG S M, HAN X, CRUSE R M, et al. Morphological characteristics and influencing factors of permanent gully and its contribution to regional soil loss based on a field investigation of 393 km² in mollisols region of northeast China [J]. *Catena*, 2022, 217:e106467.
- [22] WANG S T, LUO P P, LI W C, et al. Runoff and sediment deposition characteristics of gravel-mulched land: An experimental study [J]. *Land*, 2024, 13(4):e445.
- [23] LI Y, ARE K S, QIN Z H, et al. Farmland size increase significantly accelerates road surface rill erosion and nutrient losses in southern subtropics of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204:e104689.
- [24] 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.
- [25] MONTGOMERY D R. Road surface drainage, channel initiation, and slope instability [J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(6):1925-1932.
- [26] PATTON P C, SCHUMM S A. Gully erosion, northwestern Colorado: A threshold phenomenon [J]. *Geology*, 1975, 3(2):e88-90.
- [27] JIA Z J, WENG B S, YAN D H, et al. The effects of different factors on soil water infiltration properties in high mountain Asia: A meta-analysis [J]. *Catena*, 2024, 234:e107583.
- [28] SEUTLOALI K E, BECKEDAHL H R. Understanding the factors influencing rill erosion on roadcuts in the south eastern region of South Africa [J]. *Solid Earth*, 2015, 6(2):633-641.
- [29] WANG C M, LIU B Y, YANG Q K, et al. Unpaved road erosion after heavy storms in mountain areas of northern China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(1):29-37.
- [30] YANG B, WANG W L, GUO M M, et al. Soil erosion of unpaved loess roads subjected to an extreme rainstorm event: A case study of the Jiuyuanguo watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(6):1396-1407.
- [31] LI Y, TANG C, HUANG Z G, et al. Increase in farm size significantly accelerated stream channel erosion and associated nutrient losses from an intensive agricultural watershed [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 295:e106900.