

2022年“7·13”暴雨下生产道路侵蚀强度调查 ——以宁夏回族自治区西吉县五十岔小流域为例

阎思宇¹, 李斌斌², 于坤霞¹, 丛佩娟², 戴宁²

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2.水利部 水土保持监测中心, 北京 100053)

摘要: [目的] 探究小流域暴雨后生产道路侵蚀强度状况及侵蚀形成原因, 为今后改善水土流失状况, 完善水土保持工程建设及维护提供理论基础。[方法] 水利部水土保持监测中心于2022年7月25—29日组织开展了宁夏西吉县“7·13”暴雨水土保持综合调查。采用“断面法”对五十岔小流域生产道路进行环境及侵蚀状况调查并计算侵蚀强度, 分析生产道路侵蚀强度状况及侵蚀形成原因。[结果] ①五十岔小流域内生产道路受到降雨、道路自身特性和人类活动影响, 各条道路呈现不同的侵蚀状况, 小流域下游、顺径流方向且植被盖度较低的道路易受严重侵蚀。②对小流域的道路侵蚀模数进行了分析计算, “断面法”计算值为1 054.49 t/km², 三维影像测量值为1 277.91 t/km², 调查断面损毁率为53.39%。[结论] 实施水土保持措施是必要且有效的, 良好的水土保持措施和较高的植被覆盖率能够有效防止生产道路水土流失现象的发生。

关键词: 暴雨调查; 水土流失; 道路侵蚀; 生产道路; 侵蚀强度; 宁夏西吉县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0014-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 阎思宇, 李斌斌, 于坤霞, 等. 2022年“7·13”暴雨下生产道路侵蚀强度调查[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 14-22. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.002; Yan Siyu, Li Binbin, Yu Kunxia, et al. Investigation on erosion intensity of production roads under “7·13” rainstorm in 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 14-22.

Investigation on Erosion Intensity of Production Roads Under “7·13” Rainstorm in 2020

—Taking Wushicha Small Watershed at Xiji County, Ningxia Hui Autonomous Region as an Example

Yan Siyu¹, Li Binbin², Yu Kunxia¹, Cong Peijuan², Dai Ning²

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China,

Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2.Soil and Water

Conservation Monitoring Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: [Objective] The erosion intensity and the causes of erosion of the production roads after rainstorm in the small watershed at Xiji County, Ningxia Hui Autonomous Region were explored in order to provide a theoretical basis for improving the situation of soil erosion and improving the construction and maintenance of water and soil conservation projects in the future. [Methods] From July 25 to 29, 2022, Soil and Water Conservation Monitoring Center of the Ministry of Water Resources organized a comprehensive survey on soil and water conservation of the “7·13” rainstorm at Xiji County, Ningxia Hui Autonomous Region. The environment and erosion status of the production road in the small watershed of the Wushicha small watershed were investigated and the erosion intensity was calculated by using the “section method”. The erosion intensity status and the causes of erosion were analyzed. [Results] ① The rainfall, the characteristics

收稿日期: 2022-08-19

修回日期: 2022-09-19

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黄土高原坡面土壤侵蚀特征地带性变化及驱动机制”(42077071); 国家自然科学基金黄河水科学联合基金“黄土高原极端暴雨土壤侵蚀致灾及蓄排协调防控机制”(U2243213); 国防科工委“高分水利遥感应用示范系统(二期)”(08-Y30F02-9001-20/22)

第一作者: 阎思宇(1996—), 男(汉族), 四川省成都市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀及水土保持。Email: ysyjames09@163.com。

通讯作者: 李斌斌(1981—), 男(汉族), 河南省焦作市人, 博士后, 高级工程师, 主要从事土壤侵蚀及水土保持技术管理工作。Email: 154223338@qq.com。

of road and the human activities are the main influencing factors of the production roads erosion in the Wushicha small watershed. Each road shows different erosion patterns, among which the lower reaches of the small watershed, along the runoff direction and with low vegetation coverage are seriously eroded. ② The road erosion modulus of small watershed is analyzed and calculated. The calculated value of “section method” is 1 054.49 t/km², and the measured value of 3D image is 1 277.91 t/km². The damage rate of the survey section is 53.39%. [Conclusion] It is necessary and effective to implement soil and water conservation measures. Good soil and water conservation measures and high vegetation coverage rate can effectively prevent the occurrence of soil and water loss on production roads.

Keywords: rainstorm investigation; soil erosion; road erosion; production road; erosion intensity; Xiji County, Ningxiahui Autonomous Region

受全球气候变化影响,中国暴雨发生频率逐年增加,受暴雨影响,土壤结构遭到破坏、肥力下降,建筑设施遭到损毁^[1-2],严重可威胁民众生命财产安全^[3],不仅如此,暴雨引发的洪水灾害会导致地区发生严重的水土流失现象。生产道路是农田与非农田系统重要的基础设施,在暴雨条件下是重要的泥沙来源^[4-5],国内外诸多专家学者对生产道路侵蚀发生原因进行了研究探讨,表明道路自身土壤特性及路面状况会对道路侵蚀产生影响。Ziegler 等^[6]认为道路下垫面条件、道路边坡、道路沟渠及侵蚀沟渠等 4 个道路特征是影响生产道路侵蚀的主要因素,并在研究中指出路面透水性会影响径流系数,径流系数越大,即使小雨强也可能产生径流,对道路造成侵蚀^[7];MacDonald 等^[8]总结了道路土壤性质及结构、透水性、压实度等是影响道路侵蚀强弱的主要因素;张强等^[9]分析了黄土区土质路与被草土质路侵蚀状况,研究表明被草土质路侵蚀产沙量远低于土质路面;曹世雄等^[10]在黄土丘陵区土质路面开展实验,表明种草不仅能美化环境,起到生态修复功效,还能有效防止道路水土流失的发生。

虽然国内外研究表明了影响道路侵蚀的主要因素,但不同区域、不同气候条件、下垫面条件下,道路侵蚀量及道路侵蚀防治研究仍不足。Wang 等^[11]和 Zhang 等^[4]对暴雨后道路侵蚀量进行了试算,分析了产生道路侵蚀的原因及驱动因素,并提出水土保持措施能有效减轻道路侵蚀。水土保持措施具有改善土壤结构、蓄水保水、农田防护等基础功能^[12-14],也能够在防洪减灾中发挥重要作用^[15],尤其是在中国水土流失最严重的黄土高原地区^[16],多名学者^[17-20]研究表明,水土保持措施能够有效减少黄土高原水土流失现象。为此,调查暴雨后水土保持措施发挥的效益具有重要的实践和理论意义。

2022 年 7 月 13—16 日,宁夏回族自治区西吉县出现明显降雨过程,马莲乡、什字乡出现局地强降水,有 96 站累计降雨量超过 50 mm,有 6 站累计降雨量

超过 100 mm,在唐家河流域出现了淤地坝溃坝等安全事故,造成了严重的水土流失灾害。为深入认识暴雨条件下土壤侵蚀规律与影响,了解此次暴雨水土流失状况、土壤侵蚀强度及水土保持工程损毁状况,评价暴雨条件下水土保持各项措施安全性和有效性。2022 年 7 月 25 日至 29 日,水利部水土保持监测中心组织开展了宁夏西吉县“7·13”暴雨水土保持综合调查,对宁夏西吉县唐家河流域土壤侵蚀状况、水土流失危害和水土保持措施效果进行全面调查和分析。本文选取西吉县唐家河流域五十岔小流域生产道路侵蚀状况进行分析,对其生产道路侵蚀开展了实地调查和测量,并采用断面法计算了五十岔小流域生产道路侵蚀模数,分析了生产道路侵蚀发生原因。

1 研究区概况及技术路线

1.1 研究区概况

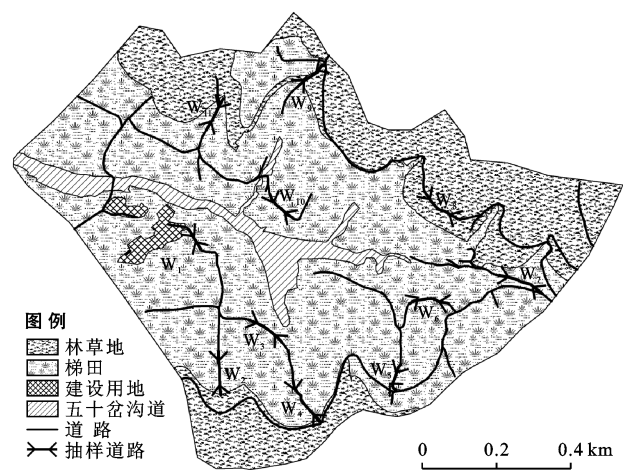
五十岔小流域位于宁夏西吉县东南将台乡李咀村,面积为 1.07 km²,属于大陆性季风气候,位于半干旱区,多年平均气温为 5.81℃,多年平均降水量为 460 mm,多年平均径流深为 42 mm,年径流量为 1.21×10⁴ m³,年输沙量为 4.58×10⁵ t。

1.2 研究方法

小流域道路侵蚀调查工作主要分为内业及外业工作,内业包括降雨前影像资料及降雨后影像资料的收集、解译和抽样工作。外业工作主要是对道路进行实地勘测。对于道路调查及计算方法均参考以往暴雨调查经验和专家学者方法^[10-11],采用断面法进行调查和侵蚀强度计算。

1.2.1 实地调查方法 在暴雨过后及时采用无人机对调查小流域进行影像拍摄工作,获取基于无人机的正射影像图(DOM)和精度为 8 cm 的数字地面模型(DSM),并生成三维遥感影像。通过对影像资料的解译,提取小流域中所有道路的空间分布情况,从而得到整个小流域内道路总长为 7.81 km,其中生产道

路长度为 7.62 km, 占总道路长度的 97.61%。按照道路主要土地管理措施(包含林地、草地和梯田)、高程和流域内分布情况作为抽样依据, 从图中抽样选出 11 条道路, 抽样道路总长为 1.11 km, 占流域道路总长的 14.26%。流域道路分布情况及抽样道路分布情况如图 1 所示。



注: W_1, \dots, W_{11} 为道路编号。下同。

图 1 五十岔小流域道路及抽样道路分布

调查时以 10 m 作为断面间隔, 对抽样道路划分 n 个断面, 并测量各断面侵蚀沟的宽、深情况, 如道路划分断面出现不足 10 m 间隔区间时, 则舍弃该区间。分别在道路起始断面、结束断面和中间随机断面进行取样, 取样体积为 100 cm^3 , 用以测量道路土壤容重。

1.2.2 道路侵蚀强度计算方法 道路侵蚀强度计算采用断面法进行计算, 计算方法为:

$$\overline{w_k} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n}$$
$$\overline{h_k} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}$$
$$Q_k = \frac{10^4 \sum_{i=1}^n w_i h_i \rho l}{A}$$
$$A_k = L_k \cdot W_k$$

式中: k 表示抽样道路编号; n 表示 k 道路的断面数; $\overline{w_k}, \overline{h_k}$ 分别表示抽样道路侵蚀沟的平均宽度和平均

深度; w_i, h_i 分别表示断面侵蚀沟的宽度和深度; Q_k 表示 k 道路的侵蚀模数; l 表示断面区间长, 本文取 10 m; A_k 表示道路 k 的面积; L_k, W_k 分别表示道路 k 的长度和宽度; ρ 表示土壤容重, 经取样测量得到五十岔小流域道路土壤容重平均为 1.43 g/cm^3 。同时采用无人机影像得到的三维影像数据对流域内道路侵蚀进行测量, 以此得到的流域道路侵蚀总量作为实际道路侵蚀总量。

2 结果与分析

2.1 道路损毁情况

现场调查中发现, 五十岔小流域生产道路侵蚀严重, 大部分生产道路受到了不同程度的冲刷, 部分道路完全损毁, 仅有少部分横向道路及覆被达 90% 以上的纵向道路断面未受侵蚀。本次道路抽样调查总长为 1.11 km, 共调查断面 118 个, 各抽样道路断面损毁统计状况详见表 1。

表 1 五十岔小流域抽样道路损毁状况统计

道路编号	断面个数/个	损毁断面个数/个	损毁断面比例/%
W_1	7	7	100
W_2	11	11	100
W_3	12	4	33.33
W_4	11	11	100
W_5	9	5	55.56
W_6	12	2	16.67
W_7	13	6	46.15
W_8	13	1	7.69
W_9	10	0	0.00
W_{10}	10	6	60.00
W_{11}	10	10	100
合计	118	63	53.39

由表 2 统计可知, 调查抽样道路断面总计 118 个, 63 个断面存在不同程度的侵蚀沟, 占总断面数的 53.39%, 其中如 W_1, W_2, W_{11} 号道路各断面均有切沟出现, 且切沟长度较长。根据道路损毁状况进行分级, 分级标准详见表 2。对抽样调查道路断面区间侵蚀强度进行分级(表 3)。

表 2 道路损毁等级分级标准

侵蚀强度	级别	生产实践标准	侵蚀强度标准
无损毁	I 级	拖拉机通行不受阻	未形成侵蚀沟
轻度损毁	II 级	拖拉机可通过, 轻微颠簸	细沟侵蚀
中度损毁	III 级	拖拉机可低速通过, 较强颠簸	出现浅沟
重度损毁	IV 级	路面需整修可通过(个人可整修)	出现切沟
完全损坏	V 级	路面完全无法通行, 需进行系统整修	出现连续切沟或道路中断

表 3 五十岔小流域抽样道路侵蚀强度分级

区间编号	侵蚀强度等级										
	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	W ₆	W ₇	W ₈	W ₉	W ₁₀	W ₁₁
1	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅰ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级
2	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅰ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级
3	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅰ级	Ⅲ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅲ级
4	Ⅴ级	Ⅲ级	Ⅰ级	Ⅲ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅳ级
5	Ⅴ级	Ⅳ级	Ⅰ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅳ级
6	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅳ级
7	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅰ级	Ⅲ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅴ级
8		Ⅳ级	Ⅰ级	Ⅳ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅴ级
9		Ⅳ级	Ⅰ级	Ⅳ级		Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅲ级	Ⅳ级
10		Ⅳ级	Ⅱ级	Ⅲ级		Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅱ级			
11			Ⅱ级			Ⅰ级	Ⅰ级	Ⅰ级			
12							Ⅰ级	Ⅰ级			

调查发现抽样道路侵蚀主要集中在 W₁, W₂, W₄, W₁₁号道路,部分断面现场情况如图 2 所示。现场调查中发现,抽样道路中裸露黄土路面受到侵蚀状况较为严重,如图 2a—2f 所示,其中图 2c—2f 展示了道路转弯处形成的特大侵蚀沟,这些侵蚀沟深度达到 3~4 m,对道路造成了严重破坏;图 2g—2h 展示了覆被道路的侵蚀状况,这些道路由于覆被率较高,基本不会形成侵蚀沟。

2.2 道路侵蚀量计算及分析

抽样道路侵蚀状况计算结果详见表 4。依据表 4 的推算成果,根据断面法计算抽样道路侵蚀总量为 161.86 t,在此基础上推算小流域的道路侵蚀总量为 1 163.06 t,基于小流域的道路侵蚀模数为 1 054.49 t/km²;利用无人机航拍影像建立的三维影像进行道路侵蚀浅沟和切沟的提取和计算,可以得到抽样道路的侵蚀总量为 200.80 t,流域道路侵蚀总量为 1 409.49 t,通过计算,可以得到流域内的道路侵蚀模数为 1 277.91 t/km²。通过计算发现,现场断面法量测与三维影像提取计算的结果存在偏差。以抽样道路侵蚀总量为例,现场断面法量测道路侵蚀总量较三维影像提取计算道路侵蚀总量低了 19.39%,主要是由于断面法以断面近似替代区间侵蚀状况,对侵蚀沟也是近似看作规则图形进行量测计算,若两断面间侵蚀状况发生显著变化,如断面区间侵蚀状况减弱,则计算结果可能偏大,断面区间侵蚀增大,则计算结果可能偏小,而三维影像能够较精确地量算出侵蚀沟体积,因此造成了两种方法间存在偏差、传统方法推算成果偏小的现象。

2.3 道路侵蚀强度影响因素

通过上文侵蚀量分析,各抽样道路侵蚀总量各不相同,且在实际调查过程中所见各条道路的侵蚀状况各有差异。道路侵蚀主要受到自然因素和人类活动

共同作用^[21],五十岔小流域道路侵蚀的影响因素可归结为降雨因素、道路特征和人类活动 3 部分。

表 4 五十岔小流域抽样道路侵蚀总量结果

道路编号	断面法侵蚀 总量/t	三维影像侵蚀 总量/t	偏差/ %
W ₁	81.52	82.12	-0.73
W ₂	48.86	60.22	-18.87
W ₃	2.11	5.41	-61.09
W ₄	7.74	14.78	-47.61
W ₅	5.25	2.75	91.04
W ₆	0.97	0.76	27.65
W ₇	2.49	13.25	-81.24
W ₈	2.64	2.78	-5.10
W ₉	0	0	0
W ₁₀	3.35	3.52	-4.85
W ₁₁	6.94	15.21	-54.38
合计	161.86	200.80	-19.39

2.3.1 降雨因素 2022 年 7 月 13—16 日,西吉县受强对流天气影响出现明显降雨过程,其中 96 站累计降雨量超过 50 mm,6 站累计降雨量超过 100 mm,其中 7 月 15 日降雨最为集中,具有短历时、雨强大的特点。距五十岔小流域最近雨量站为什字水库站,其最大 1 h 降雨、最大 3 h 降雨、最大 6 h 降雨分别为 43.6、91.6 和 115.8 mm,分别为超 10 a 一遇、超 50 a 一遇和超 100 a 一遇暴雨。在如此暴雨条件下,暴雨在短时间内迅速转换为地表径流,对路面造成冲刷,严重时出现侵蚀沟,是道路侵蚀发生的前置条件。

2.3.2 道路特征 许多专家学者研究发现道路是否覆被、土壤质地、走向、坡度等特征因素对道路侵蚀有着显著影响^[7, 21-23]。五十岔小流域道路侵蚀均发生在未硬化的生产道路路面,道路两侧土地管理措施均为梯田,且道路均无排水措施,抽样道路调查情况详见表 5 所示。

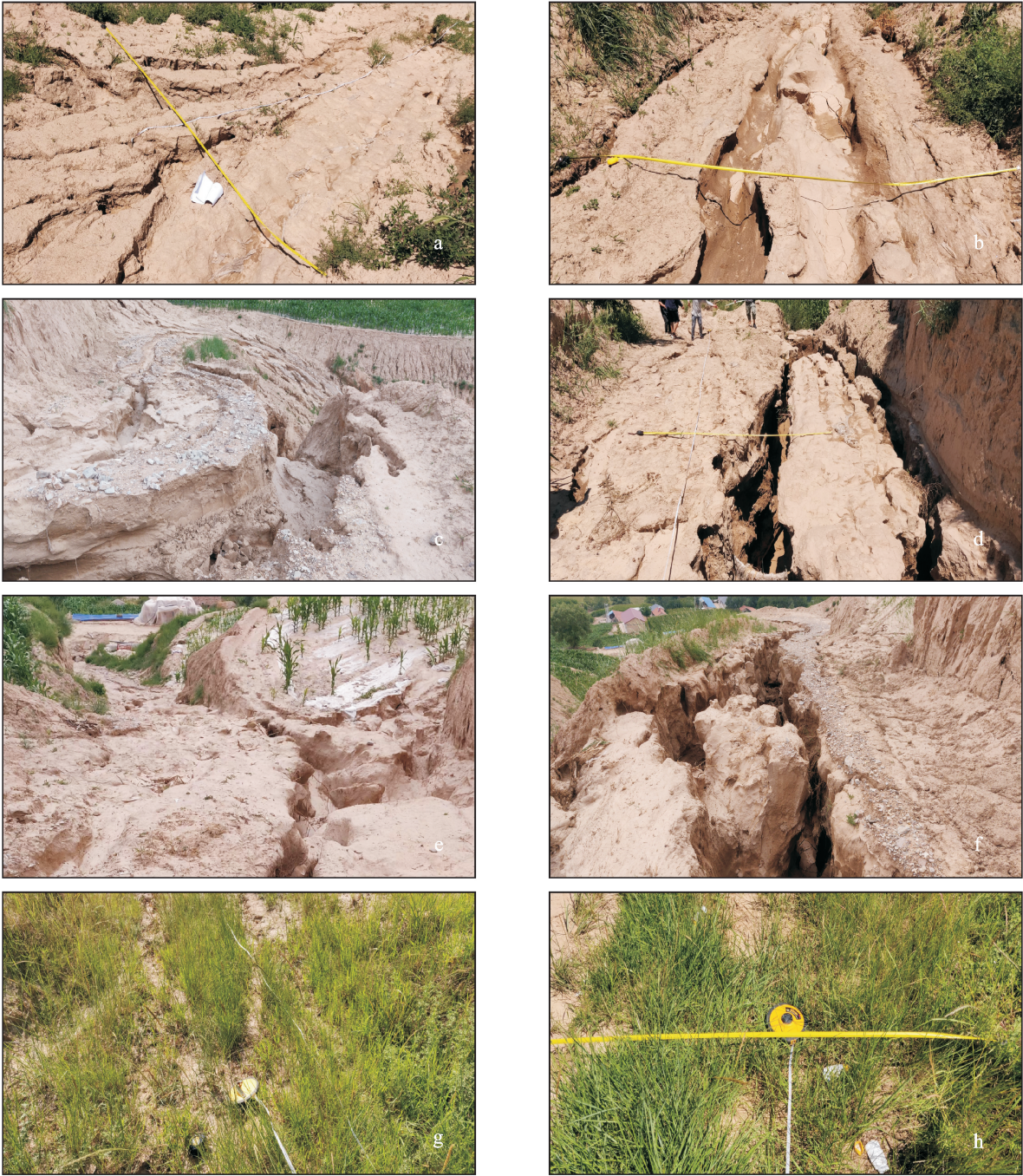


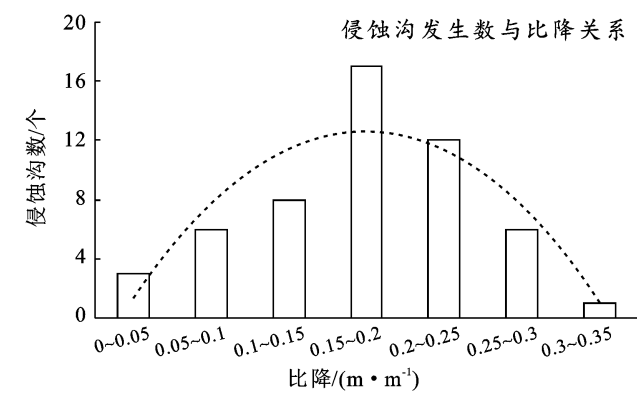
图 2 五十岔小流域部分调查断面道路侵蚀现状

表 5 五十岔小流域抽样道路路面及土地利用情况

编号	长度/m	路面状况	比降	走向	土地管理措施	环境植被盖度
W ₁	60.00	黄土裸露	0.14	顺径流方向	梯田,无排水	较差
W ₂	100.00	黄土裸露	0.19	顺径流方向	梯田,无排水	差
W ₃	112.49	黄土裸露	0.03	垂直径流方向	梯田,无排水	差
W ₄	100.00	黄土裸露	0.20	顺径流方向	梯田,无排水	较差
W ₅	82.39	路中覆被	0.16	顺径流方向	梯田,无排水	良好
W ₆	114.02	路面覆被	0.16	垂直径流方向	梯田,无排水	良好
W ₇	126.49	黄土裸露	0.05	顺径流方向	梯田,无排水	良好
W ₈	124.05	黄土裸露	0.03	垂直径流方向	梯田,无排水	良好
W ₉	99.00	路面覆被	0.17	顺径流方向	梯田,无排水	良好
W ₁₀	95.28	黄土裸露	0.01	垂直径流方向	梯田,无排水	良好
W ₁₁	99.53	黄土裸露	0.18	顺径流方向	梯田,无排水	差

注:植被盖度状况 0%~25%为差,25%~50%为较差,50%~75%为好,75%~100%为良好。

(1) 道路形态与土壤性质。王天巍等^[22]发现路面形态通过影响路面径流的水力学特征进而影响道路侵蚀,其中凹型路面产沙最多。通过调查发现,五十岔小流域道路两侧均为梯田,因此大部分道路呈现两边高中间低的凹型形态,这种汇聚型路面形态会使降雨径流集中在低洼处,水量和水流动能呈线性或指数倍增加^[24],又由于道路平均比降较大,使得降雨径流流速加快,侵蚀能力更强,而调查发现土壤构成主要为湿陷性黄土,其在天然状态下有一定承载力,但受水冲刷后,其强度变低、承载力降低,结构易受到破坏,发生沉陷,综合两种原因,使得五十岔小流域道路发生侵蚀。



(2) 道路比降。抽样调查的 11 条道路平均比降为 0.12,统计调查抽样道路侵蚀沟发生数与道路比降关系如图 3 所示。随道路比降增加,侵蚀沟发生个数呈先增后减的趋势,在比降为 0.15~0.2 区间时侵蚀沟发生数最多,占侵蚀沟发生总数的 32.08%,0.2~0.25 比降区间次之,占侵蚀沟发生总数的 22.64%。图 3 也反映了侵蚀量与道路比降的关系,各比降区,侵蚀量为 5 t 以上的侵蚀沟主要集中发生于 0.1~0.2 比降区间,这些侵蚀沟主要出现在 W₁, W₂, W₄ 和 W₁₁ 号道路,通过前文分析,这些道路是位于流域上游的顺径流方向道路,周围植被覆盖率较差,比降普遍较大,因此受雨水冲刷后易出现严重的侵蚀沟。

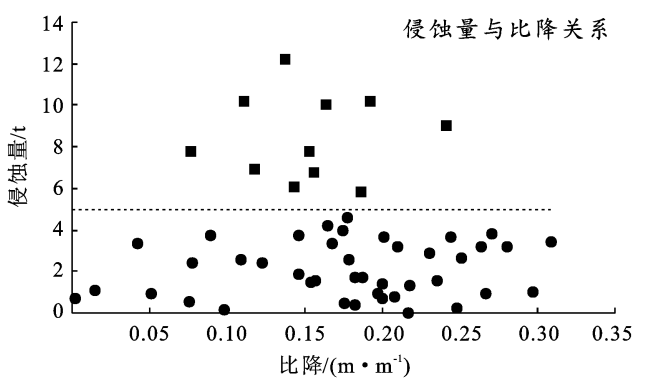


图 3 五十岔小流域道路侵蚀与比降关系

(3) 道路覆被。土壤表层植被能够减弱径流动能,有效起到减弱水蚀的作用^[25-26]。依据表 2 统计调查道路覆被情况结果显示,仅有 W₅, W₆ 和 W₉ 号道路路面有覆被。由表 4 可知,相较于植被覆盖较差的 W₁, W₂ 号道路,这些道路的侵蚀总量均较小,表明道路覆被和环境覆被能有效减少道路侵蚀的发生。尽管植被能有效减弱水蚀作用,但部分覆被较好的道路

仍发生了较严重的侵蚀。部分道路覆被和环境覆被情况如图 4 所示。其中 W₅ 号道路覆被主要在路中,道路两侧仍为裸露地表(如图 4 所示),在道路两侧形成了侵蚀沟,而 W₉ 号道路因路面植被覆盖率高,几乎不发生侵蚀。表明植被覆盖位置和盖度不同,也会对道路侵蚀产生不同的影响,盖度较低或植被未覆盖的部分易发生道路侵蚀。



W₅号道路



W₉号道路

图 4 五十岔小流域道路覆被情况

2.3.3 人类活动因素 五十岔小流域生产道路侵蚀人类活动影响主要体现在路旁土地管理措施和道路

修建工程。调查发现,五十岔小流域生产道路两旁均为梯田,虽然梯田作为水土保持措施中重要的保水保

土措施,能够有效削减流域水土流失现象,但此次调查发现,侵蚀量较大的道路旁的梯田基本处于未耕或育苗稀少的状态,使得土壤大面积裸露,而田面土层内均采用了覆膜措施(如图 5a—5b 所示),极大地增加了梯田田面的过流能力,使得这些梯田形成了天然的汇流过流平台,水流在重力作用下朝梯田田埂汇集,根据设计标准,田埂应达到 30 cm 高,但通过对梯田损毁情况的调查发现,田埂高度均未达标,实际高度不足 20 cm(如图 5c 所示)。因此,水流极易冲毁田埂,汇集于道路上,通过前文分析,道路呈凹型路面,其水流不仅来自上游降雨径流,还汇集了来自梯田的汇水,因此,导致道路侵蚀更易发生,侵蚀状况急剧。五十岔小流域部分生产道路修建时有转弯路面,调查

中发现这些路面发生的侵蚀状况比平直路面更为严重(如图 5d 所示)。路面径流在重力作用下顺平直路面汇流,当路面发生转弯时,径流会对转弯外侧路面产生冲刷后再顺路面而下,因此,路面转弯外侧发生的侵蚀状况往往较为严重。通过调查发现,五十岔小流域生产道路均未修建排水措施(如图 5e 所示),生产道路过流面均为道路路面。图 5f 为调查过程中发现较严重的道路的侵蚀,侵蚀已掏空路基,其中发现道路埋管,这部分道路内部土质较为松散;而通过观察现场进行的道路整修作业发现,整修过程中仅对侵蚀路面进行覆土填平,并没有采用压实工具对路面进行压实整平,未压实路面存在浮土,渗透能力较低,即便雨强很小时,也会在短时间内产生路面径流进而引发路面侵蚀^[27]。



a 道路两旁梯田



b 梯田覆膜



b 梯田覆膜



d 道路转弯侵蚀



e 道路现状



f 地下埋管

图 5 五十岔小流域道路侵蚀人类活动影响因素

3 讨论

许多专家学者对农村土质道路进行了产沙模拟试验,表明土质道路受道路形态、坡度和压实度等影响,入渗率较低,易发生侵蚀^[22-23]。五十岔小流域生产道路均为未硬化的黄土道路,路面整体呈现凹型,均未修建排水措施,部分路段有地下埋管,道路压实度较低,加之道路两侧梯田均未布设截排水设施,并且田面在耕作前铺设了地膜,地膜影响了水量下渗,加剧产汇流过程,梯田汇水很容易冲毁田埂顺边坡汇入道路,综合上述条件,五十岔小流域部分生产道路发生了较为严重的侵蚀现象。

根据侵蚀量计算结果,由于断面法以断面近似替代区间侵蚀状况,因此造成断面法计算结果与三维影像测量结果存在一定偏差。在实际调查过程中,受人力、物力及时间限制,无法对全流域所有道路侵蚀沟进行详细测量,采用抽样调查和断面法进行测量能节省人力、物力资源,并能在短时间内对抽样样本进行详细测量,以此来表征五十岔小流域生产道路侵蚀状况。在抽样过程中,应全方位考虑土地管理措施、分布情况,尽可能使抽样道路覆盖流域内道路所包含的特征,才不会使断面法进行侵蚀量计算时偏差过大,使得计算结果更接近实际侵蚀量,但断面法仍存在不足,若断面区间内侵蚀沟发育发生明显变化,则以断面表征区间内侵蚀状况则会产生较大误差。

五十岔小流域道路侵蚀受到降雨因素、道路特征和人类活动三方面共同作用,受到大雨强作用,地表径流急剧增大,小流域内生产道路是主要的汇流路径,同时,生产道路因其自身未硬化、坡度较大且呈凹型的路面形态,无排水、有地下埋管且未压实的不完善的修建工程和不达标的梯田修建措施,使得生产道路汇水增加,流速增大,集中成股能力增强,导致径流侵蚀力增大,对路面造成的侵蚀增大,致使小流域生产道路部分道路形成侵蚀量达5 t以上的侵蚀沟,而侵蚀沟在形态上与凹型路面相似,道路上的侵蚀沟作用于排水措施相似,径流汇聚其中,加剧了侵蚀沟的发育,最终造成了严重的水土流失现象。

通过现场的调查发现,良好的水土保持措施和植被覆盖能有效减少侵蚀现象的发生。五十岔小流域上下游、山顶和山脚植被覆盖状况、梯田内种植状况均不相同,上游梯田内作物长势较好,植被覆盖度较高,山顶采取了退耕还林还草措施,因此位于小流域上游和山顶的道路侵蚀量普遍较小,甚至不发生侵蚀;而小流域下游梯田种植密度较为稀疏,部分梯田处于未耕作状态,山脚植被覆盖率较低,因此,小流域

下游及山脚处的生产道路侵蚀量较大。

4 结论

(1) 五十岔小流域生产道路侵蚀主要受到强降雨、生产道路自身特性和人类活动三方面因素影响,使得小流域内生产道路侵蚀状况各异,其中位于小流域下游、顺径流方向且植被盖度较低的道路侵蚀状况较为严重。

(2) 基于断面法得到的流域道路侵蚀总量为1 163.06 t,基于流域道路侵蚀模数为1 054.49 t/km²,通过三维影像测量的流域道路侵蚀总量为1 409.49 t,基于流域的道路侵蚀模数为1 277.91 t/km²,调查断面损毁率达53.39%。

(3) 本次调查结果反映出实施水土保持措施是必要且有效的,而且要进一步完善截排水措施,良好的水土保持措施和植被覆盖能够有效减少侵蚀现象发生。结合本次暴雨调查成果及本文的不足之处,提出以下展望:①高精度影像资料的覆盖。实地调查受限于时间紧、人力和物力资源短缺等因素,不能在短时间内对全流域全部道路展开详细测量调查,因此,高精度影像资料的拍摄和分析能够弥补实地调查的不足。通过高精度影像资料,可以清晰提取流域内各种要素,对生产道路侵蚀状况进行全方位分析,以弥补断面法产生的计算误差。②暴雨过后及时开展暴雨水土保持调查是有必要且必须的。调查能够及时发现暴雨造成的损毁情况,反馈水土保持措施发挥的功效。调查结果能对区域水土流失治理和优化调度提供参考,使得区域水土保持工作更加完善、高效。③在未来研究中,将进一步进行建模分析,采用不同雨强、坡度、土地利用、植被盖度等因素与道路侵蚀量建立回归模型及机器学习模型,探究各因子对于道路侵蚀的贡献度,为改善道路侵蚀,完善水土保持措施管理制度提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 林祚顶,刘宝元,丛佩娟,等.山东临朐2019年“8·10”特大暴雨水土保持调查[J].水土保持学报,2021,35(1):149-153.
- [2] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):3-08.
- [3] Zhang Xuexia, Sheng Wenfei, Qi Shanzhong. Hazards and reflection on Fangshan District extreme rainstorm of July 21,2012, the urban mountainous region of Beijing, North China [J]. Natural Hazards, 2018,94(3):1459-1461.
- [4] Zhang Yan, Zhao Yiyang, Liu Baoyuan, et al. Rill and

- gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 284 (29):106580.
- [5] Nosrati K, Collins A L. Investigating the importance of recreational roads as a sediment source in a mountainous catchment using a fingerprinting procedure with different multivariate statistical techniques and a Bayesian un-mixing model [J]. *Elsevier Sponsored Documents*, 2019, 569:506-518.
- [6] Ziegler A D, Giambelluca T W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of Northern Thailand [J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 196 (1):204-229.
- [7] Ziegler A D, Giambelluca T W, Sutherland R A, et al. Erosion prediction on unpaved mountain roads in Northern Thailand: Validation of dynamic erodibility modeling using KINEROS2 [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(3):337-358.
- [8] Macdonald L H, Sampson R W, Anderson D M. Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, St John, US Virgin Islands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(3):251-272.
- [9] 张强,郑世清,田风霞,等.黄土区被草土质路面产流产沙过程及防蚀效果[J].*应用生态学报*,2010,21(7):1785-1791.
- [10] 曹世雄,陈莉,高旺盛.在黄土丘陵区土质路面种草[J].*生态学报*,2005,25(7):1754-1763.
- [11] Wang Chunmei, Liu Baoyuan, Yang Qinke, et al. Un-paved road erosion after heavy storms in mountain areas of Northern China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(1):29-37.
- [12] Han Jianqiao, Ge Wenyan, Hei Zhe, et al. Agricultural land use and management weaken the soil erosion induced by extreme rainstorms [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 301:107047.
- [13] 张超,王治国,凌峰,等.水土保持功能评价及其在水土保持区划中的应用[J].*中国水土保持科学*,2016,14 (5):90-99.
- [14] 魏义长,康玲玲,王云璋,等.水土保持措施对土壤物理性状的影响:以黄土高原水土保持世界银行贷款项目区为例[J].*水土保持学报*,2003,17(5):114-116.
- [15] 李文学.黄河治理开发与保护 70 年效益分析[J].*人民黄河*,2016,38(10):1-6.
- [16] Fu Bojie, Liu Yu, Lü Yihe, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4):284-293.
- [17] 信忠保,许炯心,余新晓.近 50 年黄土高原水土流失的时空变化[J].*生态学报*,2009,29(3):1129-1139.
- [18] 王鸿翔,杨克非,刘静航,等.黄河上游近 60 年水沙演变及影响因素分析[J].*中国农村水利水电*,2022 (3): 86-93.
- [19] 姚文艺,肖培青,申震洲,等.黄河近年径流泥沙剧减的多因素贡献率分析(英文)[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(9):1289-1304.
- [20] 尹国康.黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因分析[J].*地理学报*,1998,53(2):174-183.
- [21] 徐倩,焦菊英,严晰芹,等.道路侵蚀研究的进展与展望[J].*水土保持通报*,2021,41(4):357-367.
- [22] 王天巍,余冰,刘窑军,等.农村土质道路路面形态对道路侵蚀的影响[J].*农业工程学报*,2016, 32(19): 162-168.
- [23] 王贞,王文龙,罗婷,等.非硬化路面侵蚀产沙规律野外模拟试验[J].*农业工程学报*,2010,26(12):79-83.
- [24] Luce C H, Black T A. Sediment production from forest roads in Western Oregon [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(8):2561-2570.
- [25] 聂慧莹,王文龙,李建明,等.黄土区薄层浮土道路侵蚀试验研究[J].*自然灾害学报*,2020,29(1):101-111.
- [26] Liu Yaojun, Hu Jianmin, Wang Tianwei, et al. Effects of vegetation cover and road-concentrated flow on hill-slope erosion in rainfall and scouring simulation tests in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Catena*, 2016, 136:108-117.
- [27] Kirkby M. Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion [J]. *Catena*, 2002, 46:89-102.