

基于 WEPP 模型的工程建设中施工便道边坡水土流失特征 ——以林芝市巴宜区为例

于 洋^{1,2}, 姜群鸥^{1,2}, 王紫璇^{1,2}, 甄子云^{1,2}, 刘兰华³, 何财松³, 周 扬³

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083;3.中国铁道科学研究院集团有限公司节能环保劳卫研究所,北京 100081)

摘要: 工程建设中施工便道导致的水土流失与传统土壤侵蚀不同,施工便道改变原自然坡面形态及水文过程,致使植被破坏、地表裸露,并形成路面、挖填边坡等多个侵蚀产沙部位,结构松散的路堑及边坡对降雨的响应更强、速度更快,土质低等级道路所引起的土壤侵蚀问题占比很大,因此研究可为工程扰动中施工便道的水土流失防治提供基础依据。以林芝市巴宜区为研究对象,采用 WEPP 模型对工程扰动下不同降雨条件、不同坡度坡长情况下施工便道边坡径流量、土壤流失量进行模拟分析,揭示施工便道边坡水土流失特征规律和关键影响因素。结果表明:(1)开始产生径流的 60 min 最大雨强(I_{60})为 11.16 mm/h,降雨量为 12.40 mm; I_{60} 处于 10~17 mm/h 范围内径流量低于 0.50 mm,土壤流失量低于 0.010 kg/m²,当 I_{60} 超过 17 mm/h 后, I_{60} 与径流量、土壤流失量具有线性关系。(2)径流量随坡度增加呈“快速增加—增速减慢—逐渐减小”3 个阶段,坡度在 5°以下时产生最低径流量 56.98~58.00 mm,坡度在 30°~35°时产生最高径流量 76.19~77.01 mm;土壤流失量随坡度增加呈“先快速增加—后趋于稳定”2 个阶段,坡度在 5°以下边坡土壤流失量最小,坡度在 50°后趋于稳定。(3)靠山边坡径流量随坡长增加而降低,不靠山边坡径流量则随坡长变化保持稳定,坡长在 50 m 后靠山边坡径流量低于不靠山边坡,且差异随坡长的增加而增大;靠山边坡土壤流失量随坡长的增加呈“先快速增加—后增速减小”趋势,不靠山边坡土壤流失量随坡长的增加基本保持匀速增加。研究结果用于高寒区工程扰动后边坡水土流失驱动机制分析。

关键词: 施工便道;水土流失;边坡;WEPP 模型

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)05-0031-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.05.004

Soil and Water Loss Characteristics of Construction Service Road Hillside in Engineering Construction Based on WEPP Model

—Take Bayi District, Nyingchi City as An Example

YU Yang^{1,2}, JIANG Qunou^{1,2}, WANG Zixuan^{1,2}, ZHEN Ziyun^{1,2},

LIU Lanhua³, HE Caisong³, ZHOU Yang³

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education,

Beijing Forestry University, Beijing 100083; 3.Energy Saving and Environmental Protection and Occupational

Safety and Health Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limiter, Beijing 100081)

Abstract: The soil and water loss caused by the construction service road in engineering construction is different from the traditional soil erosion. The construction service road changes the original natural slope morphology and hydrological process, resulting in vegetation destruction, surface exposure, and has formed road surface, excavating and filling slope and other erosion and sand production sites. The road cut and slope of side with loose structure have stronger and faster response to rainfall. Soil erosion caused by soil low grade roads accounts for a large proportion, so the study provides a basis for the prevention and control of soil erosion in the construction of roadways. Taking Bayi District, Nyingchi City, as the research object, using WEPP

收稿日期:2023-02-27

资助项目:国家重点研发计划中美合作项目(2019YFE0116500);国家自然科学基金项目(41901234,31870706)

第一作者:于洋(1999—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:yuyang990211@163.com

通信作者:姜群鸥(1981—),女,教授,博士生导师,主要从事 3S 技术在资源环境的应用。E-mail:jiangqo.dls@163.com

model to simulate and analyze the runoff and soil loss of under different precipitation conditions, different slope and slope length under engineering disturbance, so as to reveal the characteristics and key influencing factors of water and soil loss. The results showed that: (1) When the maximum rain intensity in 60 min (I_{60}) was 11.16 mm/h and the rainfall was 12.40 mm, runoff began to occur; When I_{60} was in the range of 10 to 17 mm/h, the runoff was less than 0.50 mm, and the soil loss was less than 0.010 kg/m². When I_{60} was more than 17 mm/h, I_{60} had a linear relationship with the runoff and soil loss. (2) The runoff presented three stages of “rapid increase-slow down-gradual decrease” with the increase of slope. The lowest runoff was 56.98 to 58.00 mm when the slope was 5°, and the highest runoff was 76.19 to 77.01 mm when the slope was 30° to 35°. Soil loss presented two stages of “first rapid increase and then stable” with the increase of slope. When the slope was below 5°, the amount of soil and water loss was small, and the slope became stable after 50°. (3) With the increase of slope length, the runoff of backer slope decreases, while the runoff of non-backer slope remains stable. The runoff of backer slope was lower than that of non-backer slope after 50 m slope length, and the difference increases with the increase of slope length; With the increase of slope length, the soil loss of the backer slope showed a trend of “first rapid increase and then decrease”, and the soil loss of the non-backer slope basically kept a uniform increase. The results can be used to analyze the driving mechanism of soil and water loss in slope after engineering disturbance in high and cold region.

Keywords: construction service road; water and soil loss; hill side; WEPP model

水土流失是当前人类关注的全球性重要生态环境问题^[1-2],不仅导致土地资源生态环境遭到破坏、水灾旱灾频繁,还对生态平衡、经济社会发展造成严重影响。青藏高原位于高海拔地区,地形条件复杂,生态环境脆弱,也是我国水土流失易发生且较为严重的区域^[3]。除自然环境因素影响外,人类不合理的开发生产活动也是水土流失的重要诱发因素。近年来,随着我国对西藏地区开发建设强度增大,坡面道路、电网等基本设施建设带来不同程度的水土流失。工程扰动造成的水土流失不仅破坏当地环境,同时还对工程本身造成严重破坏^[4-5]。因此,工程建设对生态环境的破坏尤其是水土流失影响,已经成为国家和当地政府部门关注的重要问题之一^[6-8]。

目前,国内外对于工程建设水土流失开展了大量研究。Lal^[9]研究发现,道路建设两侧形成的裸露路面加速土壤侵蚀过程;MacDonald 等^[10]研究道路建设使地形地貌特征改变,进而改变原地表径流路径和水土流失特征;Forman 等^[11]通过研究降雨和地表径流对公路侵蚀影响发现,山区道路建设加速土壤侵蚀,改变当地水文要素,容易引发各种地质灾害。我国相关研究集中于坡面侵蚀的影响因素分析。沈海鸥等^[12]研究表明,对于黑土区土质便道土壤侵蚀,影响显著因子为降雨强度和坡度,改变地表性质可以防治土壤侵蚀;刘窑军等^[13]研究表明,山区道路建设后,草灌结合植被恢复模式的水土流失防治效益最好,相较于其他植被模式有明显的低产流量和低产沙量;及莹等^[14]通过 WEPP 模型模拟凉山自然保护区内 20 个路段的侵蚀特征表明,道路产沙量与道路长

度显著相关。这些研究发现工程建设中道路边坡是影响土壤侵蚀的重要影响因素之一^[15]。

传统水土流失调查方法具有历时长、可重复性低等局限性。美国通用土壤流失方程(USLE)是基于经验统计方法估算水土流失量,应用较广,但是对于工程扰动等人类活动导致水土流失量估算具有一定的限制性。WEPP(water erosion prediction project)模型是连续物理过程模型^[16],是迄今为止描述水蚀相关参数最多的土壤侵蚀模型^[17-19],该模型可以根据土壤类型、气候、地表覆盖类型和地形,预测土壤侵蚀和泥沙量^[20-21]。以林芝市巴宜区为研究区,基于气象、地形、地貌、地质、土壤、植被、水文等数据,采用 WEPP 模型坡面版模拟不同降雨、坡度、坡长条件下施工便道上下边坡径流量、土壤流失量,分析施工便道边坡水土流失规律,解析工程扰动下降雨、坡度与坡长对径流量和产沙量的影响趋势^[22-24]。

1 研究区概况

本研究选取西藏林芝市巴宜区施工便道为研究点,巴宜区(29°21′—30°15′N,93°27′—95°17′E)地处青藏高原念青唐古拉山东南麓,雅鲁藏布江与尼洋河在此相汇,行政区域总面积 10 238 km²。巴宜区南部为冈底斯山余脉,北部属念青唐古拉山支脉高山地段,境内平均海拔 3 000 m。该地区属温带湿润季风气候,雨量充沛,日照充足,冬季温和干燥,夏季湿润无高温。年平均气温 8.5℃,无霜期 175 天,年日照时间 2 022 h,年平均降水量 654 mm,其中,5—9 月降水量占全年降水量的 90%。研究区主要土地利用

类型为林地,其次为草地和耕地。区域植物资源丰富,呈垂直分带,从亚热带到寒带都有生长,木材资源丰富,主要树种资源有云杉、冷杉、桦树、榆树、漆树、高山松、落叶松等数十种。随着西藏地区社会经济发展和基础设施建设,加上其显著的地形高差、敏感的生态环境、恶劣的气候条件等特征,研究区水土流失生态风险逐渐增大。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究采用的气候数据来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration),选取国家级基本、基准气象站点 NY-INGCHI 站 2011—2020 年气温和降水数据;太阳辐射数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(http://data.tpdc.ac.cn),选取林芝 2001—2010 年日平均太阳辐射数据;土壤数据来源于世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD),包含土壤类型、相位、理化性质等信息;DEM 数据来源于

ASTER(advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer)、GDEM(global digital elevation map),其全球数字高程模型空间分辨率为 30 m;径流泥沙数据来源于微型径流小区观测,该试验于 2022 年 8—9 月在巴宜区施工便道进行。

2.2 研究方法

本研究采用 WEPP(坡面版)模型,定量估算不同降雨条件下研究区施工便道上下边坡径流量和土壤流失量,揭示工程建设中施工便道上下边坡水土流失状况。由于研究区地势起伏大,道路与施工地点通常存在较大高差,需建造施工便道盘山而行,因此针对施工便道修建过程中形成靠山和不靠山 2 种类型边坡进行分析(图 1),其中,施工便道靠山边坡包含上、下边坡,不靠山情况则只含下边坡。重点针对水土流失影响因素,采用控制变量法,模拟不同降雨条件、不同地形条件下施工便道水土流失情况,研究不同情况下坡面径流量和土壤流失量变化特征。

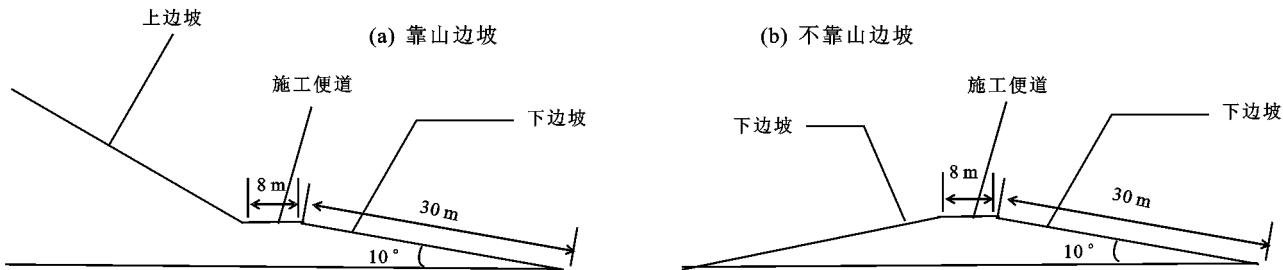


图 1 施工便道靠山边坡和不靠山边坡示意

WEPP 模型基本数据文件(库)包括气候、土壤、坡长坡度和作物管理 4 个基础数据库,所需输入参数见表 1。其中,气候文件输入选择 CLIGEN 气候生成器,用于连续性数据输入,参数较多,对数据收集的要求也较高;选择 WEPP 模块中与研究区域气候相近的气象站,分别比较每个气象站气象数据与当地气象数据的差异性,选择差异性最小的气象数据进行本地化数据的输入,包括海拔、经纬度、最高气温、最低气温、露点温度、降水量、降水天数、太阳辐射等,生成本地气候数据;运行后可输入单次降雨量、60 min 最大雨强(I_{60})、降雨历时、达到最大雨强的时间比(TP)等实际观测数据,模拟次降雨水土流失量。土壤文件按土层深度进

行分层输入,每一层包括深度、砂粒含量、黏粒含量、有机质含量、阳离子交换量和砾石含量,计算生成土壤参数:土壤初始饱和导水率、土壤反照率、土壤临界剪切力、有效水力传导系数、细沟土壤可蚀性、细沟间土壤可蚀性。坡长坡度数据库包括投影坡长、坡降比,针对本试验设计建立多个地形文件,坡度为 $5^{\circ}\sim 60^{\circ}$,变化梯度为 5° ;坡长分别为 10~120 m,变化梯度为 10 m;施工便道作为进出场临时道路,为了运输大型设备、弃土弃渣等,设置为土质两向车道,因此路面设为 8 m。作物管理数据库参数包括耕作措施参数、土壤状况参数、作物类型等方面,研究区经工程扰动,植被遭到破坏导致土石裸露,因此设置为裸地。

表 1 WEPP 模型数据库所需输入数据

数据库类型			输入参数			
CLIGEN 气候生成器气候数据库	降水量	最高温	最低气温	露点温度	太阳辐射	
单次降雨气候数据库	降雨量	降雨历时	60 min 最大雨强(I_{60})	达到最大雨强的时间比(TP)		
土壤数据库	土层深度	砂粒含量	粉粒含量	有机质含量	阳离子交换量	岩屑含量
地形数据库	坡长	坡降比				
作物管理数据库	裸地					

通过计算 Nash Sutcliffe 效率系数(ME)和决定系数(R^2)对 WEPP 模型模拟值和实测值的接近程度

进行评价。 R^2 表示模拟结果与实测值的拟合关系,通过线性拟合得到,其值越接近 1 时,表示模拟结果

与实测值吻合。Nash Sutcliffe 效率系数 (ME) 计算公式为:

$$ME = 1 - \frac{\sum (Y_e - Y_f)^2}{\sum (Y_e - Y_{ave})^2} \quad (1)$$

式中: Y_e 为实测值; Y_f 模拟值; Y_{ave} 为实测值的平均值。 $ME=1$ 表示模拟值与实测值的每对数据均相等, $ME=0$ 表示模拟值与实测值的平均值具有同样的精度; 负值表示实测值的平均值优于模型的模拟值。 ME 值越接近 1, 模拟效果越好。一般当 $ME > 0.5$ 时, 模型的模拟效果较好。

为了描述坡度、坡长对径流泥沙的影响作用, 引入环比增长率概念, 环比增长率一般是指本期数据和上期相比较的增长率。本文中径流环比增长率指坡度、坡长每增加 1 个梯度后径流量相对于上个梯度径流量的增长率, 土壤流失量环比增长率指坡度、坡长增加 1 个梯度后土壤流失量相对于上一梯度土壤流失量的增长率。计算公式为:

$$C_R = \frac{R_s - R_o}{R_o} \times 100\% \quad (2)$$

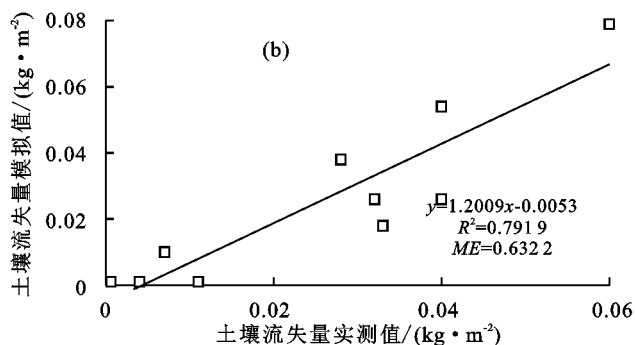
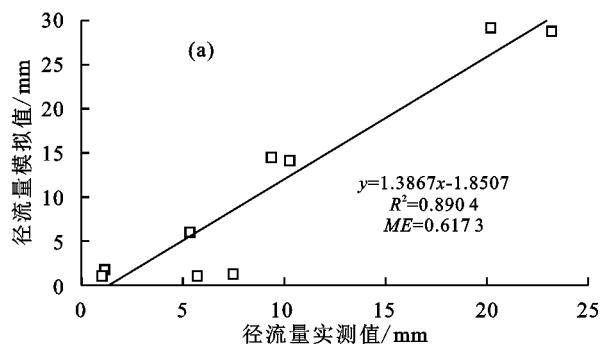


图 2 径流量、土壤流失量实测值与模拟值的对比

3.2 不同降雨条件下施工便道边坡水土流失特征

坡度、坡长作为工程建设过程中的可控因子, 同时也是影响坡面侵蚀产沙过程的重要地貌因素, 决定着坡面水土流失的沿程变化。因此, 基于巴宜区施工

便道实际坡度为 10° 、坡长为 30 m 条件, 为深入了解不同降雨类型下水土流失规律, 随机选取 2022 年的 7 次侵蚀性降雨作为样本, 运用 WEPP 模型模拟施工便道上下边坡径流量和土壤流失量 (表 2、图 3)。

3 结果与分析

3.1 WEPP 模型在施工便道边坡的适用性评价

选取 10 场人工降雨数据, 由图 2 可以看出, 径流量模拟值与实测值、土壤流失量模拟值与实测值均呈线性关系, 决定系数 (R^2) 分别为 0.890 4 和 0.791 9, Nash Sutcliffe 效率系数分别达到 0.617 3 和 0.632 2, 即 WEPP 模型对于巴宜区施工便道边坡的模拟效果较好, 也进一步说明利用 WEPP 模型模拟该地区径流量和土壤流失量特征及驱动机制是可行的。最终率定的有效水力传导系数、临界剪切力和细沟可蚀性分别为 4.400 0 mm/h, 5.600 0 Pa 和 0.039 0 s/m。

表 2 不同场次降雨下降雨过程参数及 WEPP 模型预测值

序号	降雨量/ mm	降雨 历时/h	$I_{60}/$ (mm · h ⁻¹)	TP	靠山		不靠山	
					径流量/ mm	土壤流失量/ (kg · m ⁻²)	径流量/ mm	土壤流失量/ (kg · m ⁻²)
1	13.90	5.30	24.23	0.86	1.79	0.140	1.81	0.1000
2	21.20	3.72	32.77	0.47	6.00	0.470	6.02	0.5100
3	14.80	3.98	17.07	0.42	0.23	0.009	0.25	0.0020
4	16.00	6.41	19.89	0.98	1.76	0.120	1.80	0.0880
5	26.60	5.10	11.16	0.30	0.18	0.005	0.22	0.0004
6	36.80	10.87	11.92	0	0.32	0.002	0.22	0.0006
7	12.40	6.87	13.45	0.91	0.17	0.005	0.21	0.0006

降雨产生径流是引起水土流失的主要驱动力, 径流分离土壤作为侵蚀泥沙的主要来源。该地区降雨主要集中在 4—10 月, 7 次降雨数据中降雨量为 12.40~

36.80 mm, 降雨历时为 3.72~10.87 h, 60 min 最大雨强 (I_{60}) 为 11.16~32.77 mm/h, 该地区产生径流的最低降雨量高于刘志伟等^[25]的研究, 即青藏高原中部色林错流

域形成产流的最低降雨量 1.80~5.00 mm。靠山边坡与不靠山边坡在单场降雨中的产流产沙情况差异不大,根据第 1,2,4 场降雨的 I_{60} 、径流量和土壤流失量同时最高,而降雨量高低不定,可以得出边坡水土流失主要由 I_{60} 控制。降雨初期表土含水量较低, I_{60} 较小时降雨较为平缓,坡面入渗速率大,故雨水几乎均下渗。 I_{60} 越大,表土含水量上升越快,使得入渗量减少,逐渐产生径流;第 5,6,7 场降雨 I_{60} 几乎相同,径流量和土壤流失量主要由降雨量和降雨历时共同控制,与降雨量、降雨历时呈正相关。降雨后期土壤含水量已达到饱和,侵蚀沟发育完整。因此,降雨历时越久、降雨量越大,产流越多,并且土壤流失量与径流量呈显著正相关,具有水沙同源的特征。

图 4 采用 I_{60} 表征径流量、土壤流失量模拟值的变化规律,径流量与土壤流失量随着 I_{60} 增加呈分段式增长。当 $I_{60} < 10$ mm/h 时不产生径流以及泥沙;当 I_{60} 为 10~17 mm/h 时,径流量与土壤流失量很少且变化幅度较小,径流量为 0.17~0.32 mm,土壤流

失量仅为 0.000 4~0.009 0 kg/m²,说明整体雨强偏低情况下所产生的径流量、土壤流失量处于极低水平,此时 I_{60} 的影响作用甚微;当 I_{60} 为 17~35 mm/h,径流量与土壤流失量迅速增加并保持一定增长速度,当 I_{60} 由 17.07 mm/h 增加到 19.89 mm/h 时,径流量增加 1.50 mm,土壤流失量增加 0.09~0.11 kg/m²,当 I_{60} 由 24.23 mm/h 增加到 32.77 mm/h 时,径流量增加 4.21 mm,土壤流失量增加 0.33~0.41 kg/m²。说明 17 mm/h 是侵蚀效果增强的临界 I_{60} , I_{60} 超过 17 mm/h 后每增加 1 mm/h,径流量增长 0.50 mm,土壤流失量增加 0.04 kg/m²。靠山边坡与不靠山边坡的水土流失情况差异不大,分析认为, I_{60} 处于较低水平时雨滴动能较小,到达地表时溅蚀程度较轻,此时土壤入渗率较高;随着 I_{60} 增大,降雨量相对更高,雨滴具有更强的动能,从而对坡面表层土壤的破坏作用增强,形成超渗产流,因此径流量明显增加。径流较强的冲刷能力能够携带更多地表泥沙,并进一步侵蚀表土以下土层,使得坡面土壤流失量增加。

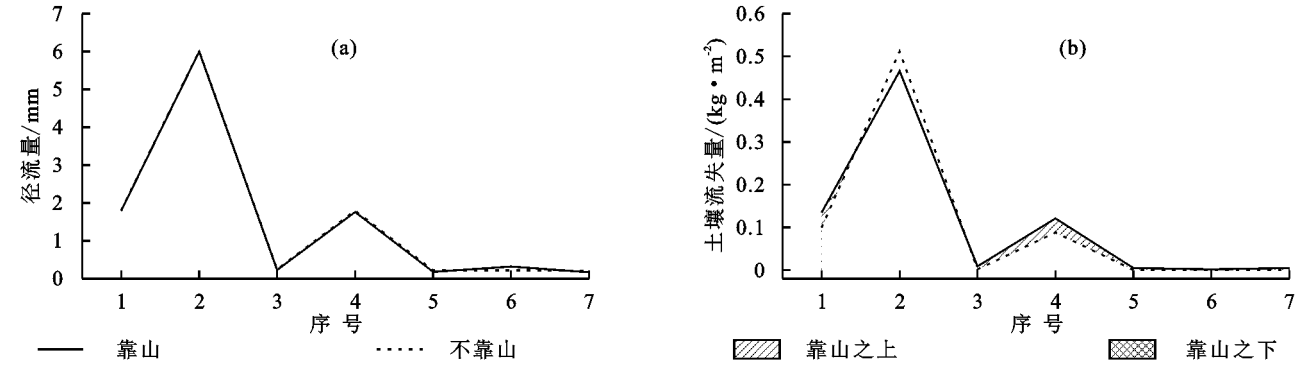


图 3 不同降雨条件下施工便道边坡径流量与土壤流失量模拟值

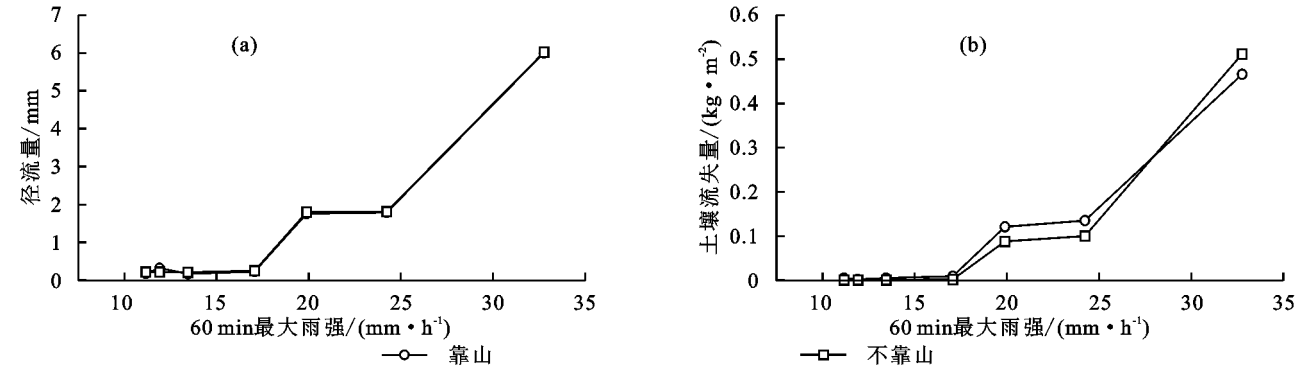


图 4 不同降雨条件下径流量与土壤流失量的变化

选取降雨强度、降雨历时等都处于平均水平的第 1 场降雨分析靠山和不靠山施工便道边坡的土壤流失曲线特征(图 5)。靠山施工便道边坡土壤流失过程显示,从坡顶向下到 14 m 处左右,开始产生土壤流失,14~27 m 属于侵蚀加速区,27~30 m 侵蚀速率降低,在 30 m 处(施工便道区)泥沙开始堆积;下坡面开始至 66 m 为第 2 个侵蚀加速区,66 m 后侵蚀

速度减缓。上边坡土壤流失量低于下边坡,原因为下边坡在施工便道处已开始产生径流,导致实际土壤流失面积增加。不靠山施工便道(此处只分析右边下边坡)边坡土壤流失过程显示,从坡顶向下到 15 m 处开始发生侵蚀,15~32 m 属于侵蚀加速区,32 m 后侵蚀速率逐渐减小,堆积速率增加。

土壤流失量随坡度增加呈现出加速增加的动态趋

势,土壤流失量随坡长增加呈现出先匀速增加、后增加速度减慢 2 种动态形式。二者共同影响了边坡侵蚀—堆积的运动形式,导致坡面侵蚀、搬运、沉积过程交替发生。

3.3 不同坡度、坡长条件下施工便道边坡水土流失演变规律

模拟无植被措施情况下坡度 $5^{\circ} \sim 60^{\circ}$ (变化梯度为 5°)、坡长 $10 \sim 120$ m (变化梯度为 10 m) 年均径流

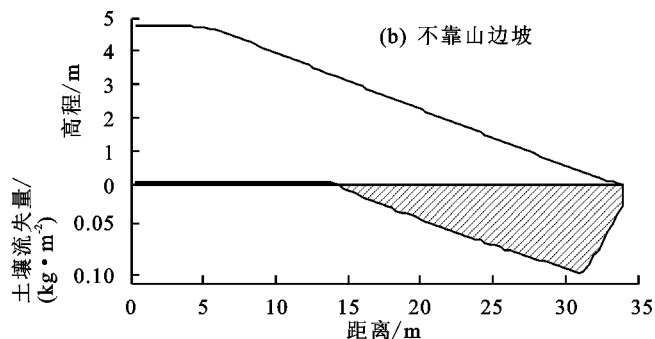
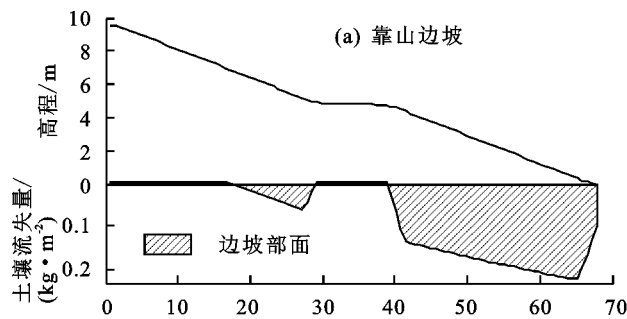


图 5 单次降雨靠山边坡、不靠山边坡土壤流失曲线

径流量模拟结果(表 3、图 6)显示,坡度对径流量的影响作用较小,随坡度增加径流量呈“快速增加—增速减慢—逐渐减小”趋势,靠山边坡径流量与不靠山边坡基本一致。坡度为 5° 以下产生最低径流量,约为 $56.98 \sim 58.00$ mm,在坡度为 30° 时靠山边坡产生径流量最高,为 76.19 mm,在坡度为 35° 时不靠山边坡产生径流量最高,为 77.01 mm,最高径流量约是 5° 以下径流量的 1.3 倍。 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 为快速增长阶段,环比增长率为 $20.74\% \sim 23.43\%$,坡度每增加 1° 径流量增长 $2.41 \sim 2.67$ mm; $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 增长速度减慢,环比增长率几乎为 0,增长速度也趋近于 0; $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 为径流量逐渐降低阶段,整体有小幅下降趋势。坡度较缓时,低强度降雨时雨水几乎都入渗土壤,难以产生地表径流或者产生较低的径流量,并且径流流速缓慢;随着坡度增大,受雨面积有所减小,重力势能转为动能导致水流流速增快,土壤入渗率降低,因此径流量增大;当坡度达到阈值后,坡面投影面积有所减小,因此出现径流量减小的趋势。

坡度对土壤流失量影响较大,随坡度增加土壤流失量呈“先快速增加—后趋于稳定”的趋势,靠山边坡的土壤流失量在 $5^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 区间略高于不靠山边坡,但差异不大。坡度为 5° 以下产生土壤流失量最低,分别为 $0.95, 1.67$ kg/m^2 ,在坡度为 50° 时产生土壤流失量最高,分别为 $75.16, 76.47$ kg/m^2 ; $5^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 为快速增长阶段,平均增长速度约为 1.65 kg/m^2 ,此阶段环比增长率逐渐递减;当坡度为 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 时,土壤流失量 < 10 kg/m^2 时,环比增长率高达 500% ;当坡度为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 时,土壤流失量约为 $10 \sim 35$ kg/m^2 时,环比增长率约为 $70\% \sim 140\%$;当坡度超过 20° 时,土壤流

量、土壤流失量,分析不同条件下水土流失演变规律,同时引用增长速度、环比增长率分析地形对施工便道边坡水土流失演变规律的影响,为后期需要进行生态恢复提供水土流失阈值标准。其中随坡度的增加,径流量呈先增加后减小,土壤流失量呈先增加后趋于稳定;随坡长的增加,径流量不靠山边坡保持稳定,靠山边坡稍有降低,土壤流失量不断增加。

失量 > 35 kg/m^2 时,环比增长率约为 $0 \sim 40\%$ 。 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 为稳定阶段,并且开始出现土壤流失量减小的情况,最终土壤流失量稳定在 70 kg/m^2 。其坡度较缓时,径流量低、流速小,携沙能力弱,产沙能力也最低;随着坡度增加,径流量增大、流速增快,侵蚀能力增强,携沙能力提高,土壤流失量随之增大;当坡度增加到一定值时,径流量开始减小,因而土壤流失量也达到峰值。

表 3 不同坡度下径流量和土壤流失量

坡度/ $^{\circ}$	靠山		不靠山	
	径流量/ mm	土壤流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	径流量/ mm	土壤流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
5	58.00	1.66	56.98	0.95
10	70.03	9.93	70.33	5.75
15	71.21	19.02	72.00	13.62
20	73.43	35.34	74.17	23.92
25	74.94	36.98	74.73	33.30
30	76.19	44.84	75.17	42.46
35	74.97	52.39	77.01	51.40
40	74.32	58.31	76.42	58.40
45	74.85	63.94	73.73	65.06
50	75.44	76.47	75.30	75.16
55	72.70	70.74	72.85	72.96
60	70.79	71.96	70.15	74.26

不同坡长条件下径流量、土壤流失量模拟结果(表 4、图 7)显示,靠山边坡径流量在坡长为 $0 \sim 50$ m 时略低于不靠山边坡,坡长为 50 m 后随着坡长的增加径流量差距逐渐增加。靠山边坡径流量随坡长增加逐渐降低,坡长为 30 m 时产生的径流量最高,为 70.03 mm,坡长为 120 m 时产生的径流量最低,为

63.57 mm,最高径流量约是最低径流量的 1.10 倍。10~30 m 径流量随坡长的增加先减小后增大,径流量分别为 69.57,67.75,70.03 mm,即在 20 m 处产生 1 个较低值;30~120 m 为径流量降低阶段,由 70.03 mm 降低至 63.57 mm,平均每增加 1 m 坡长径流量减少 0.09 mm,环比增长率类在 0 上下浮动,范围为 $\pm 3\%$ 。不靠山边坡径流量保持稳定,坡长为 10 m 时产生最大径流量为 70.93 mm,坡长为 50 m 时产生

最低径流量为 68.86 mm,平均每增加 1 m 坡长径流量变化 $-0.16\sim 0.18$ mm,环比增长率范围为 $\pm 5\%$ 。随着坡长增加,坡面承接雨水面积增大,径流不断汇集积累,流速增加,但是径流流动和携带表面泥沙均消耗能量,随着地表泥沙不断进入水流,能量消耗变大,能量降低则导致坡下部分的泥沙淤积增加,降低流速,并自发导致坡度变缓。因此,当坡长增大到一定程度后,径流量相对变小。

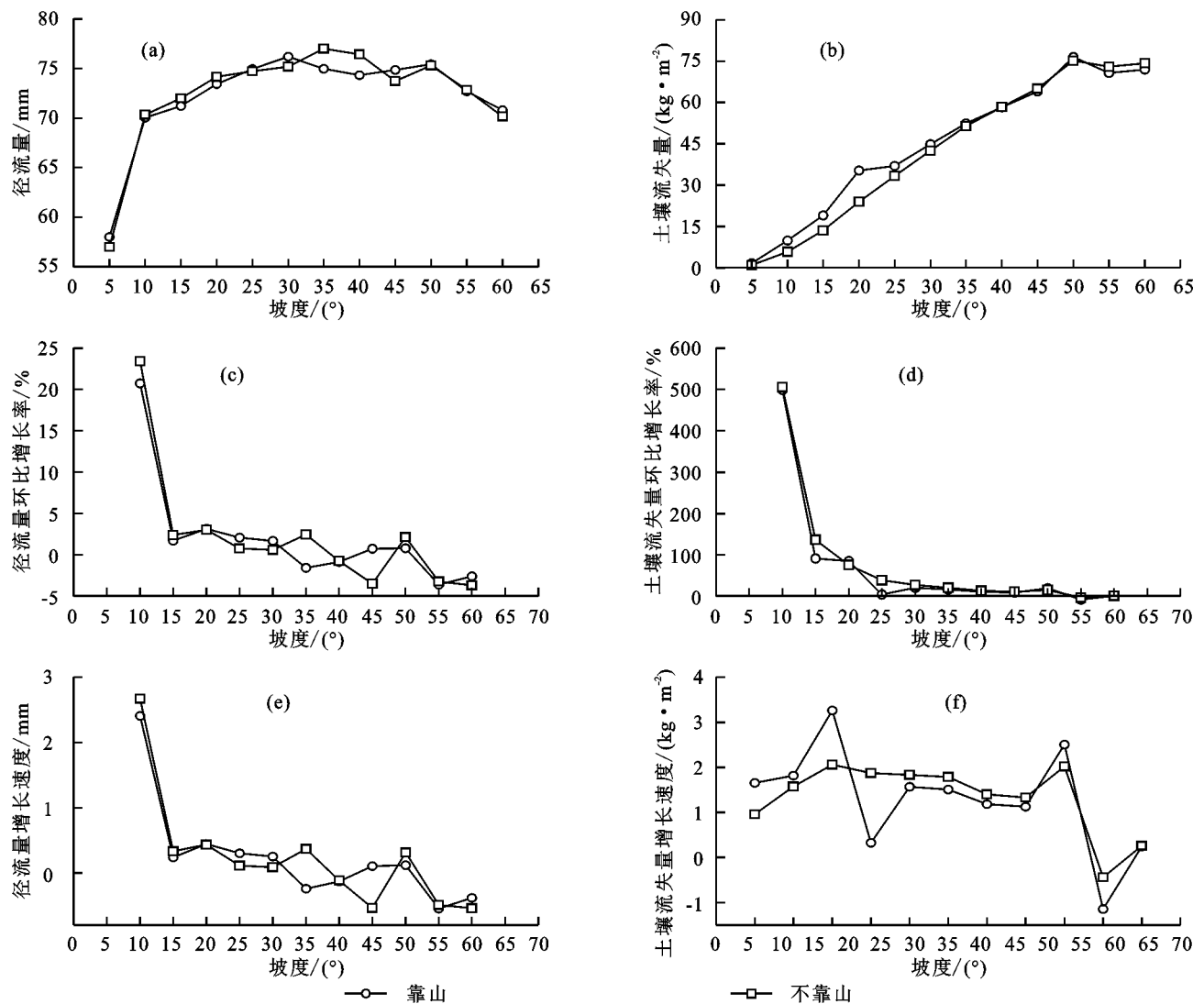


图 6 径流量与土壤流失量随坡度变化的模拟值、环比增长率和增长速度

坡长对边坡土壤流失量影响虽然不如坡度,但也非常显著,土壤流失量随坡长增加而增大。靠山施工便道边坡的土壤流失量坡长为 10~70 m 时略高于不靠山边坡,在坡长为 80~120 m 时略低于不靠山边坡。靠山边坡随坡长的增加土壤流失量呈“先快速增加—后增速减小”趋势,其中 10~30 m 快速增加,平均每增加 1 m 坡长土壤流失量增长 0.47 kg/m²;坡长为 30~120 m 时土壤流失量增长速度降低,最终增长速度不足 0.01 kg/m²,而其环比增长率呈现递减趋势;坡长为 10~20 m 时,土壤流失量分别为

1.70, 5.26 kg/m²,其环比增长率高 210%;20~30 m 时,土壤流失量增至 9.93 kg/m²,环比增长率减小到 89%;30~60 m 时,土壤流失量增至 19.52 kg/m²,环比增长率范围为 10%~40%;坡长超过 60 m,土壤流失量超过 20 kg/m²,环比增长率也迅速降低至低于 10%,认为坡长超过 60 m 后对土壤流失量的影响效益较低。不靠山边坡土壤流失量随坡长的增加保持一定速度增加,平均每增加 1 m 坡长土壤流失量增加 0.30 kg/m²;其环比增长率同样为递减趋势,坡长为 10~20 m 时,土壤流失量由 0.93 kg/

m^2 增至 $3.04 \text{ kg}/\text{m}^2$,其环比增长率最高为 229%;坡长为 20~30 m 时,土壤流失量增至 $5.75 \text{ kg}/\text{m}^2$,环比增长率减小到 89%;坡长为 30~100 m 时,土壤流失量增至 $29.46 \text{ kg}/\text{m}^2$,环比增长率为 10%~55%;坡长超过 100 m 时,其环比增长率低于 10%。认为当坡长超过 100 m 后对土壤流失量的影响效益较低。分析原因为:首先,经过工程扰动后的土壤本身团粒结构较差,径流的冲刷加剧对土壤团聚体间胶结作用的破坏,且坡面没有任何植被生长,降雨时易发生溅蚀并产生径流,挟带表层泥沙;其次,在降雨过程中,侵蚀主要发生在坡面中下部,并且后期出现侵蚀沟时坡面中下部沟长和沟深都较大,该部位为侵蚀产沙提供主要的物质来源;坡长越长,坡面下部径流的

流速越大,能显著增加径流搬运泥沙的能力。

表 4 不同坡长下径流量和土壤流失量

坡长/m	靠山		不靠山	
	径流/ mm	土壤流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	径流/ mm	土壤流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
10	69.57	1.70	70.93	0.93
20	67.75	5.26	69.34	3.04
30	70.03	9.93	70.33	5.75
40	69.85	13.71	70.23	8.96
50	68.58	16.80	68.86	12.93
60	69.04	19.52	70.68	16.91
70	67.78	21.09	70.40	20.62
80	67.40	22.93	70.02	23.94
90	65.74	24.61	69.95	26.88
100	65.44	26.13	69.43	29.46
110	65.21	26.17	69.52	31.74
120	63.57	27.17	70.86	34.20

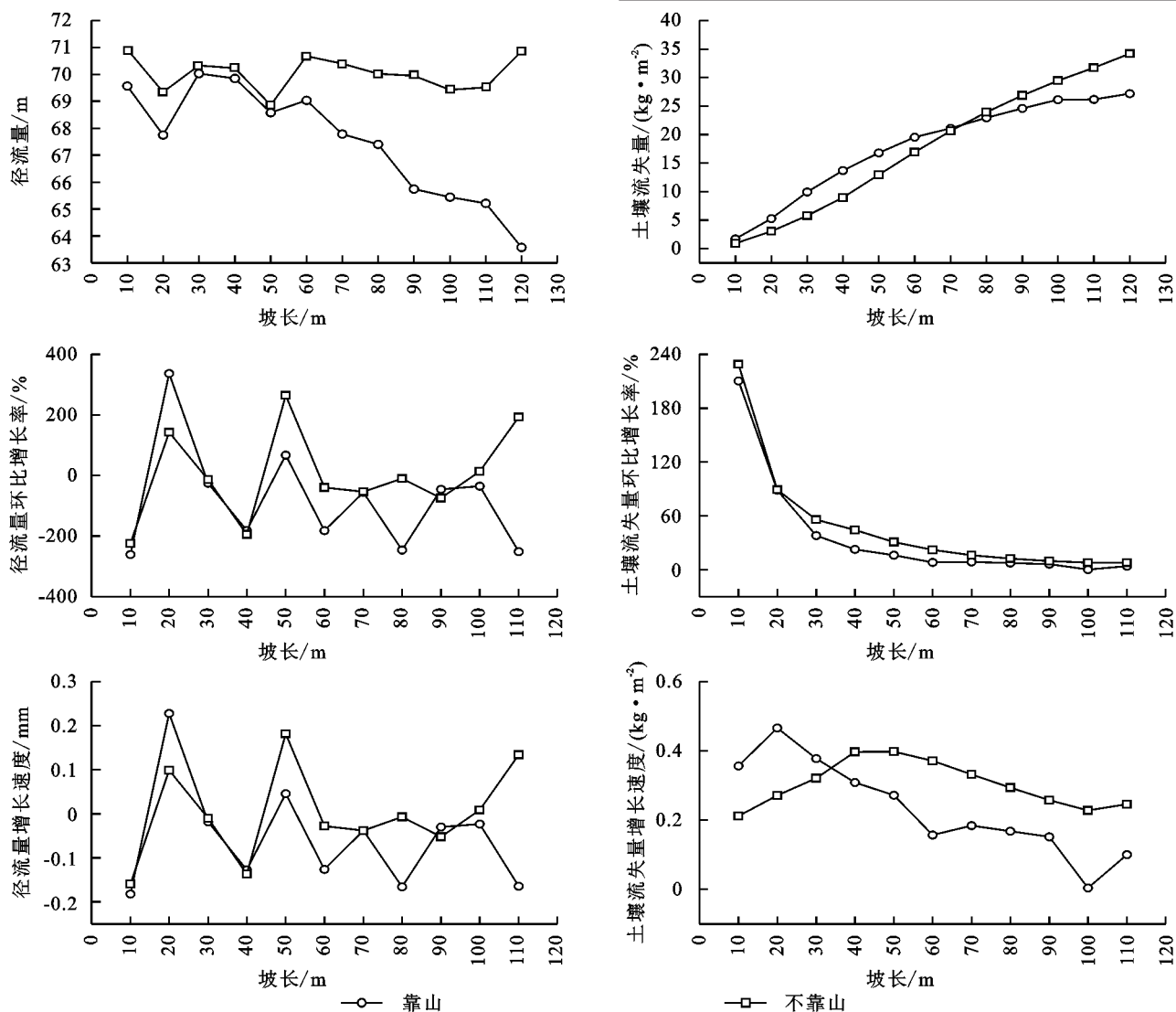


图 7 径流量与土壤流失量随坡长变化的模拟值、环比增长率和增长速度

3.4 坡度、坡长与土壤流失量的关系

以坡度、坡长为自变量,土壤流失量为因变量,构建多元回归模型,图 8 为不靠山土壤流失量回归拟合结果。其拟合 R^2 为 0.881, $p < 0.05$,表明坡度和坡长均对土壤流失量有显著影响作用,坡度和坡长均对

土壤流失量呈正向影响作用,影响系数分别为 0.238 和 0.119,土壤流失量与坡度、坡长的线性关系也均达到极显著水平,表明所建立的回归方程是有效的,也表明坡度、坡长因子直接制约着土壤流失量。

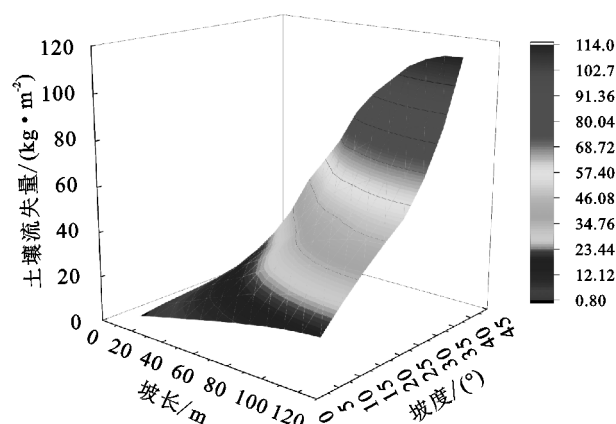


图8 土壤流失量随坡度、坡长的变化效果

4 结论

(1)研究区次降雨中产生有效径流的最小 I_{60} 为 11.16 mm/h,最低降雨量为 12.40 mm,产流量和土壤流失量主要由 I_{60} 控制,当 I_{60} 相同时,产流量则由降雨量和降雨时间共同控制。 I_{60} 在 10~17 mm/h 范围内径流量和土壤流失量保持较低水平;17 mm/h 是侵蚀增强的临界 I_{60} ,超过后每增加 1 mm/h 径流量和土壤流失量基本保持匀速增长,径流量增长约 0.5 mm,土壤流失量增加约 0.04 kg/m²,具有较好的线性关系。

(2)年均径流量随坡度增加先快速增加,后增速减慢,最终逐渐减小,最低径流量出现在坡度 5°以下,约 56.98~58.00 mm,最高径流量出现在坡度为 30°~35°时,约 76.19~77.01 mm,最高径流量约为 5°以下的 1.3 倍,10°以上坡度的变化导致的径流量变化幅度较小;土壤流失量随坡度的增加先快速增加,后趋于稳定,最低土壤流失量出现在 5°以下,约 1~2 kg/m²,最高土壤流失量出现在 50°时,约 75~76 kg/m²,最高土壤流失量约为 5°以下的 38~75 倍。相对来说,缓坡条件土壤流失量对坡度的响应最强烈,坡度阈值为 50°,超过阈值后径流量、土壤流失量不再随坡度的增加而增加。该区域 5°以下的边坡为微度侵蚀,因此不需要采取水土防治措施,只需定期进行监测即可;5°以上边坡侵蚀程度较强,是水土保持需要重点采取措施的边坡坡度,因此建议施工便道选点设计时应首选比较平缓的边坡。

(3)坡长在 0~50 m 内靠山边坡年均径流量略低于不靠山边坡,50 m 后随着坡长的增加差异逐渐增加。靠山边坡径流量随坡长增加而降低,整体降低 6.46 mm;其中坡长从 10 m 增加到 30 m 时径流量呈先减少后增加的趋势,坡长处于 30~120 m 时,径流量随坡长增加而降低,平均每增加 1 m 坡长径流量减少 0.09 mm。不靠山边坡径流量则保持稳定,径流量整体只降低 2.07 mm。靠山边坡土壤流失量随坡长的增加呈“先快速增加—后增速减小”趋势,其中坡长为 10~30 m 时土壤流失量快速增加,平均每增加 1 m 坡长土壤流失量

增长 0.47 kg/m²;坡长为 30~120 m 时,土壤流失量增长速度降低,增长速度最终降低至不足 0.01 kg/m²;不靠山边坡土壤流失量随坡长增加基本保持匀速增加,平均每增加 1 m 坡长土壤流失量增加 0.30 kg/m²。坡长小于 10 m 的边坡为微度侵蚀,可以不布设水土保持措施,但需定期监测;坡长 10~20 m 的边坡建议布设简单的植被措施;坡长超过 20 m 后,为水土保持措施重点布设监测区。

本研究就 I_{60} 、坡度、坡长对工程扰动后裸地坡面径流量和土壤流失量的影响及其关系进行分析,得出现阶段需要设置水土保持措施的坡度、坡长阈值,但对于水土保持措施需要布设的植被类型、植被覆盖度以及最优植被配置没有进行模拟讨论,还有待于后续探讨。

参考文献:

- [1] 史志华,宋长青.土壤水蚀过程研究回顾[J].水土保持学报,2016,30(5):1-10.
- [2] Sun J M, Yu X X, Li H Z, et al. Simulated erosion using soils from vegetated slopes in the Jiufeng Mountains, China [J]. Catena, 2016, 136: 128-134.
- [3] 冯君园,蔡强国,李朝霞,等.高海拔寒区融水侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2015,22(3):331-335.
- [4] 莫斌,朱世海,李峰,等.新形势下铁路工程水土流失防治探讨[J].中国水土保持,2022(3):28-31.
- [5] 马涛.浅谈如何做好铁路建设项目水土保持管理工作[J].中国水土保持,2020(4):21-23.
- [6] 高新才,魏丽华.新时代西部大开发的新格局[J].甘肃社会科学,2020,244(1):90-96.
- [7] 沈开艳.“一带一路”战略下西藏经济发展面临的几大难点[J].西藏民族大学学报(哲学社会科学版),2017,38(1):15-18,154.
- [8] 张荣华,荆莎莎,张洪达,等.胶东铁路弃土弃渣体产流产沙特征[J].水土保持学报,2018,32(3):80-85.
- [9] Lal R. Soil erosion research methods[M]. 2nd ed. U. S.: Soil and Water Conservation Society, 1994:1-10, 23-30.
- [10] MacDonald, Sampson L H, Robert W. et al. Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, St John, US Virgin Islands [J]. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 2001, 26(3): 251-272.
- [11] Forman R T, Sperling D, Bissonette J A, et al. Road ecology: Science and solutions[M]. Washington D C: Island Press, 2003: 128-190.
- [12] 沈海鸥,刘健,王宇,等.降雨强度和坡度对黑土区土质道路路面侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):123-126.
- [13] 刘窑军,王天巍,蔡崇法,等.植被措施与路面汇水对三峡库区土质道路边坡侵蚀影响[J].水科学进展,2014,25(1):98-105.

- 41(21):8602-8611.
- [6] 张孝中,王莎,申楠,等.黄河班多水电站工程区荒草地坡面水流含沙量变化过程试验研究[J].水土保持研究,2014,21(2):72-75,81.
- [7] 张建军,张宝颖,毕华兴,等.黄土区不同植被条件下的土壤抗冲性[J].北京林业大学学报,2004,26(6):25-29.
- [8] 王玲玲,姚文艺,申震洲,等.草被覆盖度对坡面流体力学参数的影响及其减沙效应[J].中国水土保持科学,2009,7(1):80-83.
- [9] 张旭昇,薛天柱,马灿,等.雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(6):66-70.
- [10] 杨帆,程金花,张洪江,等.坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J].农业机械学报,2016,47(5):129-137.
- [11] 孙一,刘晓燕,田勇,等.坡面水沙运动对植被覆盖度的响应特性试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):632-641.
- [12] Pan C Z, Shanguan Z P. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J]. Journal of Hydrology, 2006,331(1/2):178-185.
- [13] 周凡凡,高建恩,王照润,等.坡面降雨径流侵蚀输沙的不平衡特性研究[J].水土保持学报,2021,35(6):95-100.
- [14] 曹梓豪,赵清贺,丁圣彦,等.坡度和植被盖度对河岸坡面侵蚀产沙特征的影响[J].自然资源学报,2017,32(11):1892-1904.
- [15] 刘纪根,雷廷武,蔡强国.施加聚丙烯酰胺后坡长对侵蚀产沙过程的影响[J].水利学报,2004,35(1):57-61.
- [16] 王清源,张乐涛,魏仪媛,等.基于能量的坡面侵蚀性径流及其水沙传递关系[J].农业工程学报,2022,38(1):151-157.
- [17] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.
- [18] 余新晓,张学霞,李建牢,等.黄土地区小流域植被覆盖和降水对侵蚀产沙过程的影响[J].生态学报,2006,26(1):1-8.
- [19] 张锐波,张丽萍,钱婧,等.雨强和植被覆盖度对坡地侵蚀产沙影响强度研究[J].自然灾害学报,2017,26(5):206-212.
- [20] 王佩佩,苏雪萌,周正朝,等.黄土丘陵区典型植被群落坡面土壤优先流特征及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(5):16-23.
- [21] 温云浩,刘铁军,马林芊,等.东北黑土区横垄坡耕地的产流产沙过程[J].水土保持通报,2021,41(6):63-70.
- [22] Liu J E, Qi X Q, Ma C Y, et al. Response of sheet erosion to the characteristics of physical soil crusts for Loessial soils [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022: e905045.
- [23] Zhang W T, Yu D S, Shi X Z, et al. Variation of sediment concentration and its drivers under different soil management systems[J]. Pedosphere, 2010,20(5):578-585.
- [24] 陈利顶,贾福岩,汪亚峰.黄土丘陵区坡面形态和植被组合的土壤侵蚀效应研究[J].地理科学,2015,35(9):1176-1182.
- [25] Wu B, Wang Z L, Zhang Q W, et al. Evaluating and modelling splash detachment capacity based on laboratory experiments[J]. Catena, 2019,176:189-196.
- [26] 安晨,方海燕,王奋忠.密云水库上游坡面产流产沙特征及降雨响应:以石匣小流域为例[J].中国水土保持科学,2020,18(5):43-51.
- [27] Yüksek F, Yüksek T. Growth performance of Sainfoin and its effects on the runoff, soil loss and sediment concentration in a semi-arid region of Turkey [J]. Catena, 2015,133:309-317.
- (上接第39页)
- [14] 及莹,蔡体久.利用 WEPP 模型模拟凉水自然保护区部分道路侵蚀对河流泥沙含量影响特征[J].安徽农业科学,2014,42(5):1479-1481,1519.
- [15] 王恒松,熊康宁,张芳美.地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究[J].水土保持通报,2015,35(4):1-7.
- [16] 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):48-59,116.
- [17] 谢云,岳天雨.土壤侵蚀模型在水土保持实践中的应用[J].中国水土保持科学,2018,16(1):25-37.
- [18] Saghaian B, Meghdadi A R, Sima S. Application of the WEPP model to determine sources of run-off and sediment in a forested watershed [J]. Hydrological Processes, 2015,29(4):481-497.
- [19] 李想,曾以禹,朱思雨,等.北京山区径流侵蚀过程及 WEPP 模型适用性评价[J].水土保持学报,2018,32(3):98-106.
- [20] 秦隆宇.基于不同水土保持措施下径流小区降雨与产流产沙关系研究[J].黑龙江水利科技,2018,46(11):51-54.
- [21] 谢林好,白玉洁,张凤宝,等.沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响[J].土壤学报,2017,54(1):60-72.
- [22] 彭旭东,戴全厚,杨智,等.喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J].土壤学报,2016,53(5):1237-1248.
- [23] 李坤,姚文艺,肖培青,等.植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展[J].中国水土保持,2017(3):27-30.
- [24] 刘畅,周毅,雷雪.陕北黄土高原水蚀沟谷多维度侵蚀特征量化研究[J].地理科学进展,2022,41(4):707-717.
- [25] 刘志伟,李胜男,郭燕红,等.青藏高原原林错流域高寒草原坡面产流特征及其影响因素[J].生态学报,2021,40(8):2388-2399.