

# 降雨和植被覆盖对铁路路基边坡土壤侵蚀的影响

朱永杰<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 刘自强<sup>2</sup>

(1.上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335; 2.南京林业大学, 江苏 南京 210037)

**摘要:** [目的] 探究不同植被覆盖对边坡径流泥沙的削减作用, 为改善道路路基边坡的植被配置, 减少公路边坡的水土流失量提供科学参考。[方法] 选取江苏省南通市境内在建的南京市—启东市铁路路基为研究对象。利用坡面观测小区, 选取观测期内不同降雨强度(15, 28, 40, 63, 82 mm/h)的自然降雨条件, 对3种植被覆盖(灌草坡面、植草坡面和裸坡坡面)的坡面产流与产沙进行分析, 揭示植被覆盖对径流和泥沙的拦蓄作用。[结果] 降雨强度对初始产流时间影响显著( $p < 0.05$ ), 3种植被覆盖的初始产流时间随降雨强度的增加逐渐减少, 植草坡面和草灌结合坡面相比裸坡坡面对初始产流时间的延缓作用显著。随着降雨强度的增加, 3种下垫面坡面径流量均呈增大的趋势, 植草和草灌结合坡面相比裸坡坡面有较好的削减坡面径流作用。试验条件下, 草灌结合坡面削减率在54.20%~63.68%, 植草坡面削减率在38.59%~55.37%。随着降雨强度的增加, 裸露坡面所产生的泥沙量呈指数型递增, 在降雨强度大于63 mm后尤为明显, 由662.66 g (15 mm/h)陡增至2 002.95 g (82 mm/h)。植草和草灌结合坡面随降雨强度的增大产沙量增加不明显, 泥沙产生量在0.9~4.9 g。[结论] 路基边坡产流产沙随着降雨强度的增大而增加, 降雨对坡面产流产沙影响显著; 植草坡面和草灌结合坡面相比裸坡坡面有非常明显的减少土壤侵蚀的效果。

**关键词:** 降雨; 植被; 路基边坡; 径流泥沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0008-07

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 朱永杰, 王超, 刘自强. 降雨和植被覆盖对铁路路基边坡土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 8-14. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.002; Zhu Yongjie, Wang Chao, Liu Ziqiang. Effects of rainfall and vegetation cover on soil erosion of railway bed slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 8-14.

## Effects of Rainfall and Vegetation Cover on Soil Erosion of Railway Bed Slope

Zhu Yongjie<sup>1</sup>, Wang Chao<sup>1</sup>, Liu Ziqiang<sup>2</sup>

(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200335, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjiang, Jiangsu 210037, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different vegetation cover on reducing runoff and sediment of slope were investigated, in order to provide reference for improving vegetation configuration and reducing soil and water loss of road bed slope. [Methods] The natural rainfall with different rainfall intensities (15, 28, 40, 63 and 82 mm/h) during the observation period was selected to analyze the runoff and sediment yield on three different vegetation types, which located at Nanjing—Qidong railway of Nantong City of Jiangsu Province. [Results] Rainfall intensity had a significant effect on the initial runoff producing time ( $p < 0.05$ ). The initial runoff time of three different vegetation types was shortened with the increase of rainfall intensity, indicating the effect of rainfall intensity on the initial runoff generation time was very significant. The grass planting slope and grass irrigation combination slope could delay the initial runoff generation time effectively. Compared with bare slope, grass and grass irrigation combined slope had better effect on reducing slope runoff. Under the experimental conditions, grass irrigation combined slope reduction rate was 54.20%~63.68%, and grass vegetation slope reduction rate was 38.59%~55.37%. With the increase of rainfall intensity, the sediment

收稿日期: 2021-06-17

修回日期: 2021-07-26

资助项目: 上海市水务局与上海勘测设计研究院有限公司共建项目“上海市水土保持区域评估编制技术要点”(6015212620602)

第一作者: 朱永杰(1990—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持方面的研究。Email: 2770554454@qq.com。

通讯作者: 刘自强(1992—), 男(汉族), 江苏省南京市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持方面的研究。Email: liuzistrong@njfu.edu.cn。

yield on the exposed slope increase exponentially, especially when the rainfall intensity was more than 63 mm, the sediment of bare slope increased from 662.66 g (15 mm/h) to 2 002.95 g (82 mm/h). With the increase of rainfall intensity, the sediment yield on the slope combined with grass planting and grass irrigation did not increase significantly. Sediment yield ranged from 0.9 g to 4.9 g. [Conclusions] The runoff and sediment of railway bed slope increases with the increase of rainfall intensity, and rainfall has a significant effect on sediment yield on slope. Compared with bare slope, vegetation slope and grass-irrigated slope can reduce soil erosion significantly.

**Keywords: rainfall; vegetation; runoff and sediment; railway bed slope**

在现代化建设进程中,土地利用类型不断发生着变化。公路、高速铁路建设而发生的坡面开挖填筑一定程度上改变了原地貌,路基坡面由此所产生的径流排放以及降雨对坡面造成的冲刷侵蚀成为生态修复和水土保持的重点内容。由于在下垫面硬化区域形成的雨水径流在汇集速度和峰值流量上都远高于非硬化下垫面区域,这也就使得这些区域道路路面积水洪涝灾害等问题的时有发生<sup>[1-5]</sup>。路基坡面作为路基生态环境的重要组成部分,不仅能够起到坡面防护的稳定性作用,更重要的是能够改善和美化生态环境。此外,经植被绿化后的坡面在削减降雨径流、泥沙量以及涵养地下水方面较裸坡坡面都有着较好的效果<sup>[6]</sup>。

目前,植被护坡作为坡面保持水土以及涵养水源的有效措施,已逐渐成为公路和铁路路基重要的护坡形式<sup>[7]</sup>。不同公路采取不同的边坡措施进行防护,目前多数公路或铁路路基坡面采用混凝土骨架或框格加绿化防护,即工程措施与林草措施相结合的方式;但也有仅采取植物绿化的防护措施。路基边坡绿化植物种类参差不齐,较好的坡面绿化采用植草加植灌结合绿化,并充分考虑景观效果,也存在一般性的采取纯植草的坡面绿化。坡面种植植物中,高羊茅是绿化效果较好的冷季型草坪草之一<sup>[8]</sup>,已在林草植被恢复建设中得到广泛应用<sup>[9]</sup>。红叶石楠在绿化工程中较为常见,较适用于我过华东及西南地区<sup>[10-14]</sup>。金森女贞也是绿化应用较多的灌木植物之一,为半落叶灌木,在冬季有较好的的适应性<sup>[15-18]</sup>。近年来,对植被的研究大多数集中在对污染物去除效果以及对植物边坡产流产沙受降雨与坡度的影响关系方面。王敏等<sup>[19]</sup>对植被缓冲带滞缓径流和农田氮磷污染物去除能力开展定量化试验,研究表明草被植物缓冲带对氨氮的去除率比裸地提高 268%;霍炜洁等<sup>[20]</sup>通过对比 3 种土壤—植物系统,得到土壤—植草系统对溶解污染物的去除率显著优于其他 2 种系统;美英等<sup>[21]</sup>人采用盆栽试验研究草本植物中黑麦草、地毯草、早熟禾、高羊茅对重金属铅的吸收富集和去除效率,结果表明草本植物对雨水中重金属铅的吸收富集和去除有较好的效率;徐宪立等<sup>[22]</sup>利用径流小区研究发现,径流深度和土壤侵蚀模数与降雨量以及平均降雨强

度的乘积程线性相关;史彦林<sup>[23]</sup>采用径流小区研究发现,路基边坡工程+植物实施后能有效防止土壤侵蚀。但自然条件下,降雨和植被对路基坡面的交互影响研究尚且较少,在未来极端天气频发的背景下,有必要探究降水变化和下垫面变化等对土壤侵蚀的交互影响规律。

为了更好地了解草被植物及草灌结合植被在削减坡面径流、减少土壤侵蚀的作用效果,本研究通过观测 3 种不同下垫面类型坡面径流小区在不同降雨强度的降雨产流产沙量,从而得到 3 种不同下垫面类型坡面径流小区对初始产流时间的影响规律以及对坡面径流泥沙的削减作用效果,为进一步探索路基坡面植被对降雨径流泥沙的调控能力、在道路建设中合理规划坡面绿化措施并发挥其生态效应、提高填筑坡面的稳定性提供一定的理论参考。

## 1 研究区概况

所选取的路基边坡观测样地位于江苏省南通市在建南京市—启东市铁路(宁启铁路)路基段(31°53'42"N,121°21'47"E),路基边坡高 7.5 m,坡比为 1:1.5,观测样地单元为铁路路基 3 个方形混凝土框格,每个样地面积大小为 18.75 m<sup>2</sup>(投影面积)。该监测样地边界采用砖砌加混凝土抹面,以减少样地的边界效应影响,样地下方设有径流及泥沙收集池,收集池规格大小为 2 500 mm×1 000 mm×1 000 mm。

研究区所在区域多年平均气温 15.2 °C,极端最高气温 39.5 °C,极端最低气温 -10.8 °C,年最大降水量 1 626.8 mm,多年平均降水量 1 060 mm,年降水天数 120 d,多年平均蒸发量 1 421.2 mm,平均风速 3.1~3.2 m/s。

观测样地所填筑的耕植土为江苏地区常见的黄棕壤,该层土覆土厚度约为 30 cm,在耕作土填筑完成尚未开始种植绿化前,测定该填筑土壤的密度大小为 1.50 g/cm<sup>3</sup>。将土壤采样对其粒径组成进行室内分析,运用 Nicomp(美国)380N3000 激光粒径分析仪对其粒径组成进行分析,分析得到砂粒(≥2~0.02 mm)所占比例为 76.08%,粉粒(0.02~0.002 mm)所占比例为 23.39%,黏粒(<0.002 mm)所占比例为 0.53%。

裸坡坡面为完全裸露的坡面径流小区;植草坡面和草灌结合坡面种植日期均为 2 月初左右,种植期间专人养护,植物长势良好;其中植草坡面植物种类为高羊茅,种植方式为坡面撒播草籽,种植期大约为 100 d(2—5 月),覆盖度(VFC)采用方格法测定<sup>[24-26]</sup>为 95%;草灌结合坡面为高羊茅草籽与金森女贞结合种植,种植期大约为 100~120 d(2—5 月),金森女贞(苗)1 m 种植 2 道每道 6 棵合计 12 棵/m,成活率达 99%以上,单个护坡单元间距约为 2.5 m,覆盖度测定为 95±1%。观测小区边界采用砖砌加混凝土抹面,无人踩踏及扰动。

## 2 试验设计

所选样地为上海勘测设计研究院有限公司水土保持监测范围内在建工程的一段路基,在路基填筑完成并且建立符合要求的坡面径流小区后开始进行观测,同时在地架设一个不锈钢雨量筒对现场降雨进行实时测量,根据雨量筒的小时降雨量计算监测现场的平均降雨强度(mm/h)。为了更好地控制单一变量,观测期内选取同一年(2018 年)降雨量相同或接近的降雨场次作为有效观测数据,且所选有效降雨场次的前 1 d 有 1~6 mm 大小不等的自然降雨或人为洒水,并使用手持式土壤水分检测仪(UPA-20MT)进行水分测定,土壤初始含水率基本接近预降雨后的含水率(30±5%);观测内容为所选样地在一定降雨条件下径流及泥沙情况。观测样地下垫面类型分裸坡坡面、植草坡面、草灌结合坡面 3 种下垫面类型,每种下垫面对应观测降雨量为 80±5 mm,现场观测计算对应降雨强度为 15,28,40,63 和 82 mm/h 共 5 场降雨径流泥沙数据。降雨过程中需要用秒表记录初始产流时间。单场降雨结束后,在径流泥沙浑浊状态根据收集池规格及径流深,测定径流量(L);沉淀池泥沙沉淀后,大部分径流通过清水池侧面底端出水口流出,部分被蒸发,将携带一定水分的泥沙带回室内进行烘干分析,测定其干重(g)。降雨观测项目详见表 1。

表 1 南通闸站降雨观测时间及结果

时间	降雨量/ mm	观测降雨 时长/min
20180524	83.0	332.0
20180630	85.0	62.2
20180722	81.5	77.6
20180816	77.0	115.5
20180920	75.5	161.8

径流削减率采用下式计算:

$$Q = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:Q 为径流削减率(%); $Q_1$  为裸露坡面产生的径流总量(L); $Q_2$  为植草和草灌结合坡面产生的径流量(L)。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同植被覆盖类型坡面初始产流时间分析

不同降雨强度条件下,3 种下垫面的初始产流时间如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着降雨强度的增加,裸坡坡面、植草坡面和草灌结合坡面的初始产流时间均呈缩短的趋势,且在降雨强度大于 28 mm 后,初始产流时间缩短明显。植草坡面和草灌结合覆盖坡面初始产流时间明显要比裸坡坡面长,差异性水平达到显著水平( $p < 0.05$ );植草坡面和草灌结合坡面相比裸坡坡面对初始产流时间有较好的延缓作用,两者差异性不显著( $p > 0.05$ );植草坡面延缓初始产流时间在 23'47"—48'55",平均延缓 38'28",草灌结合坡面延缓初始产流时间在 43'37"—68'17",平均延缓 54'34"。随着降雨强度的增加,植草坡面的初始产流时间由 140'(15 mm/h)缩短至 30'57"(82 mm/h),草灌结合坡面的初始产流时间由 153'(15 mm/h)缩短至 50'47"(82 mm/h),裸坡坡面的初始产流时间由 154'(15 mm/h)缩短至 7'10"(82 mm/h)。同时可以看出,降雨强度对 3 种下垫面初始产流时间的影响程度显著;在降雨量相同情况下,不同降雨强度植草坡面和草灌结合坡面的初始产流时间差异性均达到极显著性水平( $p < 0.01$ ),裸坡坡面为显著水平( $p < 0.05$ )。这主要是因为不同植被类型坡面随着降雨强度增大,单位时间内坡面上的有效降雨量越多,初始产流时间也就越短。降雨强度对初始产流的影响达到极显著水平(表 2),这与王保一等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。坡面观测小区初始产流时间一定程度上与土壤初始含水率有关,本文所选取的降雨观测场次土壤前期含水率,在观测期经测定含水率较为接近;若能对土壤含水率进行实时监测,取得含水率相同数值进行初始产流时间试验,能更好说明降雨强度与初始产流时间的关系。植草坡面和草灌结合坡面相比于裸坡坡面对初始产流时间表现出很好的延缓效果。这是由于地表植被的存在,使地表糙度增加并延长了径流路径,植被根系也有利于增加土壤入渗强度<sup>[28]</sup>,此外,草灌冠层对降雨有一定的截留作用,草灌覆盖削弱了雨滴对地表土粒的击溅冲击<sup>[29]</sup>,使土壤能够保持较强的人渗率较长时间,从而延缓了初始产流时间。

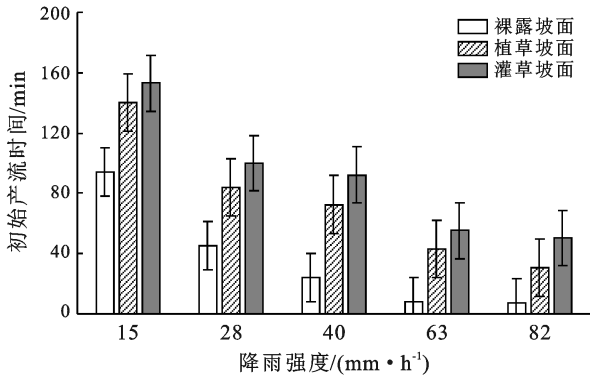


图 1 研究区不同降雨强度各下垫面初始产流时间

表 2 研究区 3 种下垫面初始产流时间对比方差分析

差异源	离均差平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F 值	p 值
组间	38 568.133	2	5 112.29	4.911	0.047 *
组内	94 227.600	12	7 852.300	—	—
总计	132 795.733	14	—	—	—

注: \* 表示差异显著性水平为 0.05, \*\* 表示差异显著性水平为 0.01。下同。

### 3.2 不同植被覆盖类型的坡面径流量分析

3 种下垫面在不同降雨强度条件下的坡面径流总量如图 2 所示。从图 2 可以看出,降雨量基本相同的情况下,随着降雨强度的增加,3 种下垫面坡面径流量均呈增大的趋势,且裸坡坡面径流总量明显大于植草和草灌结合坡面,差异性水平达到极显著水平 ( $p=0.001$ ),说明植草和草灌结合坡面有较好的削减坡面径流作用;植草坡面与草灌结合坡面相比,径流量在各降雨强度下较为接近,差异性不显著 ( $p=0.196 > 0.05$ ),说明两者削减径流效果无明显差异(表 3)。

表 3 研究区 3 种下垫面径流量对比方差分析

差异源	离均差平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F 值	p 值
组间	1 846.586	2	923.293	13.558	0.001 **
组内	817.169	12	68.097	—	—
总计	2 663.755	14	—	—	—

5 个降雨强度下植草坡面径流总量均值分别为 13.10, 22.58, 25.84, 27.26 和 33.20 L, 差异性水平显

著 ( $p < 0.05$ ); 草灌结合坡面径流总量均值分别为 10.66, 16.96, 17.91, 20.53 和 26.41 L, 差异性水平显著 ( $p < 0.05$ ); 裸坡坡面径流总量均值分别为 29.35, 41.46, 42.08, 51.54 和 57.67 L, 差异性水平也为显著 ( $p < 0.05$ )。说明在降雨强度对 3 种下垫面的径流总量影响均为明显。

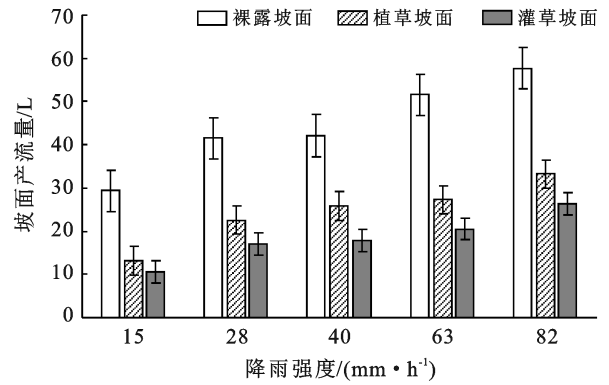


图 2 研究区不同降雨强度各下垫面径流量

对 3 种下垫面的径流总量分析发现,草灌结合坡面对坡面径流的削减效果最为明显,削减率在 54.20%~63.68%,对径流的平均削减率达到 58.92%;其次是植草坡面,其径流削减率在 38.59%~55.37%,对径流的平均削减率为 45.81%。由此可见,植草和草灌结合坡面在路基坡面(铁路或公路)中能够很好的起到保持水土,调蓄雨水径流,增加土壤入渗的作用。从表 4 还可以看出,削减率与降雨强度呈一定的线性关系。植草和草灌结合坡面对径流的削减率随着降雨强度的增大,大致呈减小的趋势。这主要是因为降雨强度较小时,植被的冠层截留作用较为明显,到达地表的雨水就相对较少,再加上对土壤入渗的影响,进而较大的影响其产流量;降雨强度较大时,植被冠层对降雨的截留作用会减小,并且由于植被地表生长的生物结皮和覆被物的存在会对植草和草灌结合坡面的初始产流时间产生一定影响,地表生物结皮的存在使土壤初始入渗速率低于裸地<sup>[30-34]</sup>,两种作用因素的综合,使降雨强度较大的情况下,削减率减小。

表 4 研究区不同降雨量及下垫面类型总径流量及径流削减率

降雨强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	裸坡坡面径流总量/L	植草坡面径流总量/L	草灌结合坡面径流总量/L	植草坡面径流削减率/%	草灌结合坡面径流削减率/%
15	29.35	13.10	10.66	55.37	63.68
28	41.46	22.58	16.96	45.54	59.09
40	42.08	25.84	17.91	38.59	57.44
63	51.54	27.26	20.53	47.11	60.16
82	57.67	33.20	26.41	42.43	54.20
平均	44.42	24.40	18.49	45.81	58.92

### 3.3 不同植被覆盖类型坡面产沙量分析

不同降雨强度条件下,3种下垫面的产沙量如图3所示。从图3可以看出,随着降雨强度的增加,裸坡坡面所产生的泥沙量呈指数型递增( $R^2=0.98$ ),且在降雨强度大于60 mm后,泥沙量增加尤其明显。植草和草灌结合坡面产沙量随降雨强度的增加递增程度较缓和,3种下垫面产沙量差异性水平达到极显著水平( $p<0.01$ );植草坡面和草灌结合坡面相比裸露坡面有非常明显的减少土壤侵蚀的效果。随着降雨强度的增加,裸坡坡面的含沙量由662.66 g(15 mm/h)陡增至2002.95 g(82 mm/h)。裸坡坡面所产生的泥沙量呈指数型递增,在降雨强度大于60 mm后尤为明显,对土壤侵蚀程度明显;植草坡面、草灌结合坡面、裸坡坡面三者产沙量差异性水平达到显著或极显著水平,有非常明显的减少土壤侵蚀的效果,这与霍云梅等<sup>[36]</sup>不同模拟降雨条件下的产沙结果规律基本一致。而植草坡面的含沙量由14.57 g(15 mm/h)增加至318.20 g(82 mm/h),草灌结合坡面的含沙量由9.13 g(15 mm/h)增加至45.12 g(82 mm/h),3者之间差异性显著,保土效果明显。这主要是因为,一方面植被的覆盖减少甚至阻止了雨滴对土壤的溅蚀作用,另一方面也减少了径流的产生量,从而减少了径流在坡面汇流过程中所携带的泥沙量,因此,在一定条件下,植草和草灌结合坡面泥沙含量比裸坡坡面大幅度减少。

表5 研究区降雨及植被覆盖类型对径流量交互影响方差分析

差异源	离均差平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F 值	p 值
降雨—植被覆盖	65.726	8	8.216	—	—

表6 研究区降雨及植被覆盖类型对泥沙量交互影响方差分析

差异源	离均差平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F 值	p 值
降雨—植被覆盖	674 977.764	8	84 372.220	—	—

再对降雨强度和下垫面类型两个因子与削减率进行回归分析,拟合得到如下方程:

$$Q = (0.658 - 0.052 \ln I + 0.131 N) \times 100\% \quad (2)$$

$$R^2 = 0.83$$

式中:Q表示径流削减率(%);I表示降雨强度(mm/min);N表示下垫面类型(植草坡面取0,草灌结合坡面取1)。

用上式计算得到各个降雨强度和下垫面条件下的径流削减率模拟值与实测值对比结果如图4所示。从图4可以看出,模拟得到的削减率与实测值较为接近,模拟值与实测值绝对误差基本在1.0%~6.6%,说明方程得到的模拟值精度较好;模拟值平均值与实测值平均值的绝对误差为5.9%,拟合效果较为理想。

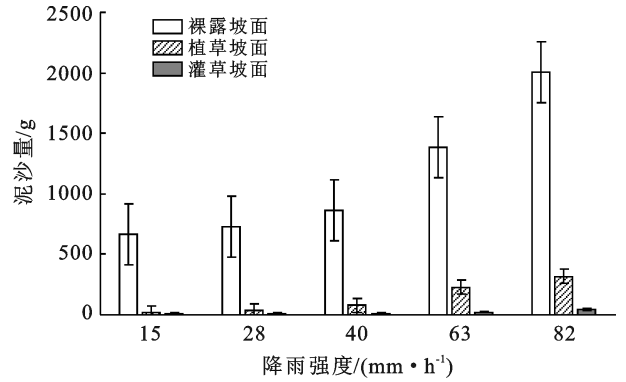


图3 研究区不同降雨强度各下垫面产沙量

### 3.4 降雨和植被覆盖交互影响及削减率分析

根据上述分析可知,降雨强度和下垫面与路基坡面的产流效果有较大的相关关系。王万中等<sup>[35-36]</sup>研究表明土壤侵蚀产生的径流泥沙与降雨强度为幂函数关系,彭文英等<sup>[27]</sup>对有植被覆盖土地利用方式研究发现降雨量与径流量用幂函数拟合效果较为理想,李宏伟等<sup>[33]</sup>认为随降雨强度和坡度的增大径流产生速率呈幂函数形式增大,且相关性较好,同时,有研究发现径流量与降雨强度在10°,15°,20°3个坡度下表现为幂相关<sup>[24]</sup>。对降雨和植被覆盖类型两个因子与路基边坡产流产沙进行二因素交互影响分析发现(表5—6),两者对路基边坡的径流产生量及泥沙量均呈现极显著的影响。

并且从表中可以看出,模拟值的变化规律与实测值变化规律基本一致。

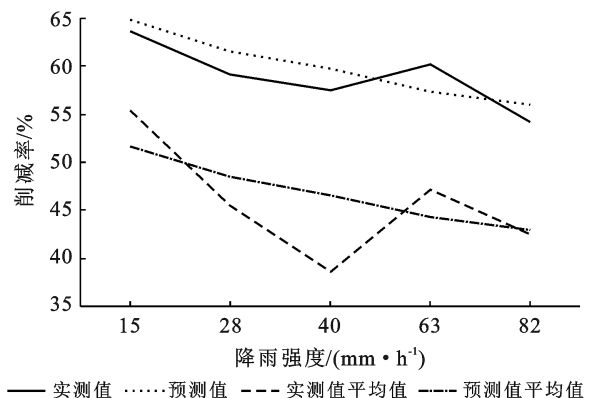


图4 研究区不同降雨强度和下垫面削减率实测值与模拟值对照

## 4 讨论与结论

### 4.1 结论

(1) 铁路路基裸坡坡面、植草坡面与草灌结合坡面的初始产流时间与降雨强度均呈负相关关系,降雨强度和坡度越大,初始产流时间越短,且降雨强度单因素对初始产流的影响达到极显著水平。植草坡面与草灌结合坡面对初始产流时间的延缓作用明显,且两者延缓坡面初始产流时间的作用效果差异不明显。

(2) 随着降雨强度的增加,3种下垫面径流量均呈增大的趋势,降雨强度对铁路路基坡面径流总量影响显著。植草坡面与草灌结合坡面的总径流量与裸坡坡面相比差异性达到极显著水平,植草坡面与草灌结合坡面对径流总量具有明显的削减效果,两者的削减效果差异性不显著,但草灌结合坡面削减效果优于植草坡面,坡面植物措施可优先考虑灌草结合为宜。

(3) 降雨和植被覆盖对铁路路基坡面径流及泥沙的交互影响呈现极显著影响,通过线性回归分析得到拟合度较高的降雨强度和植被类型与削减率回归方程经检验,方程精度较好,模拟值与实测值偏差较小。

### 4.2 讨论

(1) 观测数据在实测条件下进行,本文所选取的有效降雨场次降雨量接近,但未能做到降雨量完全相同,因此在实际条件下的径流量和泥沙量等与人工降雨模拟降雨量完全一致存在差异。

(2) 降雨强度对初始产流的影响达到极显著水平,这与王保一等<sup>[35]</sup>的研究结果一致。坡面观测小区初始产流时间一定程度上与土壤初始含水率有关,本文所选取的降雨观测场次土壤前期含水率存在一定的不可控误差;若能对土壤含水率进行实时监测,取得含水率相同数值进行初始产流时间试验,能更好说明降雨强度与初始产流时间的关系。

(3) 本文只观测满覆盖度下的削减作用,增加草地覆盖度梯度的铁路路基坡面小区设计能够更好地说明植草坡面或草灌结合坡面的削减效果变化规律,应该在后续的试验设计中增加雨强设计梯次,进行更深入的研究。

### [参 考 文 献]

[1] Candela A, Brigandì G, Aronica G T. Estimation of synthetic flood design hydrographs using a distributed rainfall-runoff model coupled with a copula-based single storm rainfall generator [J]. *Natural Hazards and Earth*

*System Sciences*, 2014, 14(7): 1819-1833.

[2] 史培军,袁艺,陈晋.深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J].*生态学报*,2001,21(7):1041-1049.

[3] Xh A, Jsn A, Cmi A, et al. Recent global land cover dynamics and implications for soil erosion and carbon losses from deforestation [J]. *Anthropocene*, 2021,34: 100-291.

[4] Dwabc D, Zya D, Yca D, et al. Characterisation of soil erosion and overland flow on vegetation-growing slopes in fragile ecological regions: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,285:112-165.

[5] Guo Lijia, Liu Ruimin, Men Cong, et al. Multiscale spatiotemporal characteristics of landscape patterns, hotspots, and influencing factors for soil erosion [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,779:464-74.

[6] 葛怡,史培军,周俊华,等.土地利用变化驱动下的上海市区水灾灾情模拟[J].*自然灾害学报*,2003,12(3):25-30.

[7] 李晓文,方精云,朴世龙.近10年来长江下游土地利用变化及其生态环境效应[J].*地理学报*,2003,58(5): 659-667.

[8] Deng Yuanhong, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Characteristics of soil moisture storage from 1979 to 2017 in the karst area of China [J]. *Geocarto International*, 2021,36(8):903-917.

[9] Mirakhorlo M S, Rahimzadegan M. Analysing the land-use change effects on soil erosion and sediment in the North of Iran; A case study: Talar watershed [J]. *Geocarto International*, 2021, 36(8): 936-956.

[10] Li Xiaowen, Fang Jingyun, Park Shilong. Land use change and its ecological environment effect in the lower reaches of the Yangtze River in the past 10 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003,58(5):659-667.

[11] 贺宝根,陈春根,周乃晟,等.城市化地区径流系数及其应用[J].*上海环境科学*,2003,22(7):472-475.

[12] 王永磊,卜德龙,李振.人工模拟降雨径流影响因素及其规律研究[J].*山东建筑大学学报*,2012,27(1):11-15.

[13] 柯尧.点播灌木绿化技术在南广铁路路基边坡植被防护中的应用[J].*铁道标准设计*,2015(8):30-34.

[14] 杨清海,吕淑华,李秀艳,等.城市绿地对雨水径流污染物的削减作用[J].*华东师范大学学报(自然科学版)*, 2008(2):41-47.

[15] Wang Zhi, Zeng Yun, Li Cheng, et al. Telecoupling cropland soil erosion with distant drivers within China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112395.

[16] 徐胜,何兴元,陈玮,等.高羊茅对高温的生理生态响应[J].*应用生态学报*,2007,18(10):2219-2226.

[17] 程开云.红叶石楠特征特性及其栽植技术[J].*科技致*

- 富向导, 2013 (2): 292-292.
- [18] 孙越信, 孙向云, 许东海, 等. 浅析金森女贞和金叶女贞的区别及在园林绿化中的应用[J]. 上海农业科技, 2009 (3): 108-110.
- [19] 王敏, 黄宇驰, 吴建强. 植被缓冲带径流渗流水量分配及氮磷污染物去除定量研究[J]. 环境科学, 2010, 31 (11): 2607-2612.
- [20] 霍炜洁, 周怀东, 刘玲花, 等. 土壤-植物系统对径流污染物截留的影响因子分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 798-804.
- [21] 美英, 杨晓华, 郭亚男, 等. 植物滞留系统草本植物对人工雨水中铅的富集及去除效果[J]. 水土保持学报, 2013, 1(33): 158-161.
- [22] 徐宪立, 张科利, 庞玲, 等. 青藏公路路堤边坡产流产沙规律及影响因素分析[J]. 地理科学, 2006, 26(2): 211-216.
- [23] 史彦林. 高速公路路基边坡水土流失防治效果试验研究[J]. 中国水土保持, 2013(6): 58-59.
- [24] Remund D, Liebisch F, Liniger H P, et al. The origin of sediment and particulate phosphorus inputs into water bodies in the Swiss Midlands: A twenty-year field study of soil erosion [J]. *Catena*, 2021, 203(1): 105290.
- [25] Siddharth T, Sridhar P, Vinila V, et al. Environmental applications of microbial extracellular polymeric substance(EPS): A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 1(12): 287-307.
- [26] 关法春, 梁正伟, 王忠红, 等. 方格法与数字图像法测定盐碱化草地植被盖度的比较[J]. 东北农业大学学报, 2010, 42(1): 130-133.
- [27] 彭文英, 张科利. 不同土地利用产流产沙与降雨特征的关系[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 25-29.
- [28] 杨有海, 夏琼, 苏在朝, 等. 骨架护坡配合种植紫穗槐整治黄土路堤边坡浅层溜坍病害[J]. 路基工程, 2004(4): 75-76.
- [29] 岳中辉. 黑土酶活性分布特征研究[D]. 黑龙江 哈尔滨: 东北农业大学, 2006.
- [30] 张鼎华, 叶章发, 范必有, 等. 抚育间伐对人工林土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 672-676.
- [31] 王万中, 张宪奎. 中国降雨侵蚀力  $R$  值的计算与分布(I)[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 7-18.
- [32] 田风霞, 王占礼, 牛振华, 等. 黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 141-146.
- [33] 李宏伟, 王文龙, 王贞, 等. 神府东胜煤田扰动地面野外降雨试验[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 11-15.
- [34] 代数, 蒋光毅, 夏清, 等. 坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产流产沙特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25 (4): 1-5.
- [35] 王保一, 张荣华, 荆莎莎. 降雨和坡度对路基边坡产流产沙的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 118-124.
- [36] 霍云梅. 覆盖度、雨强及坡度对城市典型草坪绿地坡面产沙影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.