

黄土丘陵区土质路面与植物路侵蚀过程及其防蚀效应模拟试验研究

王玉¹, 田风霞⁴, 马春艳^{2,3}, 郑世清^{2,3}

(1. 延安市宝塔区项目办, 陕西 延安 716000; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对黄土高原严重的道路侵蚀问题, 通过室内人工模拟降雨及人工放水试验, 对黄土山坡土质路与植物路侵蚀过程进行了研究, 并对比分析了植物路与土质路的侵蚀过程差异及其减水减沙效应。研究表明, 在相同的试验条件下, 植物路侵蚀过程呈逐渐减弱趋势, 可用对数函数进行描述; 而土质路侵蚀过程呈非稳定现象; 植物路具有明显的蓄流减蚀作用。

关键词: 黄土丘陵区; 土质路; 植物路; 道路侵蚀过程; 防蚀效应

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2009)04—0007—04

中图分类号: S157.2

Stimulation Research on Erosion Process and Antierosion Effects of Earth and Plants Covered Roads in Loess Hilly Region

WANG Yu¹, TIAN Feng-xia⁴, MA Chun-yan^{2,3}, ZHENG Shi-qing^{2,3}

(1. The Project Office of Baota District in Yan 'an City, Yan 'an, Shaanxi 716000, China; 2. Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Resource and Environment of Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: In order to illustrate the relatively significant antierosion effects of plants covered roads, erosion processes on earth and plants covered roads under artificial rainfall were simulated indoor and in the fields. The results showed that the processes of erosion on the earth and plants covered roads were different. Plants covered road can effectively reduce the sediment and water loess, the intension of erosion presented decrease trend, and the variations of road erosion modulus with rainfall intensity and slope gradient can be described with exponential equations; the pocess of earth covered road presented non-stability status; there is obvious effect of runoff-increasing and erosion-decreasing for plants covered road.

Keywords: loess hilly region; earth covered roads; plants covered roads; roads erosion process; antierosion effects

1 前言

道路侵蚀是黄土地区普遍存在的一种极其严重的侵蚀类型。针对黄土高原严重的道路侵蚀问题, 1997—2002 年郑世清等人^[1-2]在延安开展了黄土高原道路侵蚀与防治研究, 并在延安燕沟流域对黄土区植物路植物根系与水保功能进行了评价, 初步筛选出适合土质路面种植的 8 种草种。2002—2004 年, 水利部水土保持监测中心与中国科学院水利部水土保

持研究所、延安市水土保持世行贷款项目办公室合作开展了“黄土丘陵区山坡生产型植物路综合防护技术体系”农业科技成果转化与深化研究。项目试验区安排在延安市燕沟流域鸡蛋峁村、小砭沟流域, 并在燕沟流域、小砭沟流域、安塞县南沟 3 个流域完成了项目推广种植任务。曹世雄等^[3-4]在小砭沟流域, 对黄土丘陵区土质路面种草、路面草种生长发育及通行能力等进行了研究。该项目共选定适宜山坡生产型植物路种植的植物品种 31 种, 其中道路边坡防护、防蚀

收稿日期: 2008-12-23

修回日期: 2009-03-08

资助项目: 国家科技支撑计划“西部村镇植被构建技术和水土流失防治技术的组装集成与示范”(2006BAJ10B06); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-05)

作者简介: 王玉(1972—), 男(汉族), 陕西省延安市人, 工程师, 主要从事水土保持生态环境研究。E-mail: wangyu6051@163.com。

通信作者: 郑世清(1953—), 男(汉族), 陕西省延川县人, 研究员, 主要从事水土保持综合治理与研究。E-mail: zheng_shiqing@126.com。

的草灌品种 15 种,如紫穗槐、沙打旺、山桃、山杏、沙棘等;路面抗压防蚀草种 16 种,如无芒雀麦、披碱草、早熟禾、扁穗冰草、强旱生草坪型高羊茅草等。并构建了黄土丘陵区干道、支道、便道生物防蚀体系和路面种草、路畔植树、路面集水利用的山坡生产型植物路优化配置模式。但是,由于山坡生产型植物路综合防护技术体系研究,在国内外都是一个较新的研究课题,相关研究极少。特别在山坡生产型植物路防蚀机理与效应、规划设计的技术指标体系等方面还缺乏系统研究。为此,在已有研究的基础上,在室内开展了黄土山坡生产型植物路防蚀机理与效应的模拟试验研究。在研究揭示黄土山坡土质路与植物路侵蚀过程的基础上,对比分析了植物路与土质路侵蚀过程的差异及其减水减沙效应^[5-6],以期为黄土高原彻底根治道路侵蚀,促进农业经济发展及新农村建设提供科学依据。

2 研究方法 with 材料

2.1 人工模拟降雨试验

试验是在中科院水土保持研究所人工降雨大厅完成的。试验用土为陕北黄绵土,在试验过程中将土壤分层称重夯实填装在自制可调节坡度的钢槽内,供试土壤容重为 1.35 g/cm^3 ,试验钢槽规格 $2 \text{ m} \times 0.55 \text{ m} \times 0.35 \text{ m}$,装土深度 0.30 m ,装土体积 0.33 m^3 ,可调节坡度为 $0 \sim 18^\circ$,试验设计坡度分为 $6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ$ 共 5 个坡级,降雨强度分别为 $1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ 和 3.0 mm/min 共 5 个雨强等级。下垫面分为土质裸露路面和种植早熟禾草本植物两种类型。为保证土质路面与种草路面土壤容重的一致性,在播种过程中,将开沟土体称重后保存,在植物生长过程中,逐步回填后使其达到统一容重。植物路覆盖度控制在 $30\%, 40\%, 50\%, 60\%, 70\%$ 范围。在对供试草种精细管护,使得草种的长势稳定后方可进行试验。土质路面人工降雨试验由相同坡度 (15°)、不同雨强 ($0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 \text{ mm/min}$) 和相同雨强 (2.0 mm/min)、不同坡度 ($6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ$) 共 10 场降雨试验组成。植物路小区人工降雨试验由相同坡度 (15°) 和雨强 (2.0 mm/min),不同植被覆盖度 ($30\%, 40\%, 50\%, 60\%, 70\%$),以及相同坡度 (15°)、相同植被覆盖度 (50%),不同降雨强度 ($0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 \text{ mm/min}$) 及相同雨强 (2.0 mm/min),相同植被覆盖度 (50%),不同坡度 ($6^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 15^\circ, 18^\circ$) 共 15 场降雨试验组成,各组试验重复一次总共 50 场次。降雨历时为 60 min ,观测试验全过程,开始产流后,前 5 min 每隔 $2 \sim 3 \text{ min}$ 观测一次,以后每隔 3 min 观

测一次,用编号采样桶分别收集各时段全部浑水径流,经量取和烘干,获取试验径流和泥沙量。

2.2 降雨 + 放水试验

主要为了模拟坡长对坡面径流及侵蚀的影响,而采取的一种便于实现的方法来研究不同坡长范围内对坡面水文与侵蚀的作用。按照 $4, 6, 8, 10, 12 \text{ m}$ 坡长, 15° 坡度, 2.0 mm/min 的降雨强度,植物路径流系数采用 0.4 ,裸路径流系数采用 0.65 进行设计,降雨为侧喷式,放水试验采用马氏瓶控制放水流量,降雨地面处理同样分土质路面和植物路面两种类型。土质路面放水 + 降雨组合试验由相同坡度 (15°),相同雨强 (2.0 mm/min),不同放水流量 ($2.3 \times 10^{-5}, 4.6 \times 10^{-5}, 6.9 \times 10^{-5}, 9.2 \times 10^{-5}, 1.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) 共 5 个组次,每场试验重复一次,共 10 场次降雨试验。植物路 + 降雨组合试验由相同坡度 (15°),相同植被覆盖度 (50%),相同雨强 (2.0 mm/min),不同放水流量 ($1.4 \times 10^{-5}, 2.8 \times 10^{-5}, 4.2 \times 10^{-5}, 5.6 \times 10^{-5}, 7.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$) 共 5 个组次,每场试验重复一次,共 10 场次降雨试验。

3 试验结果与讨论

3.1 土质路降雨 + 放水试验侵蚀过程

3.1.1 土质道路侵蚀率变化过程 由图 1 可以看出,在 $I = 2 \text{ mm/min}$ + 放水试验中, $0 \sim 5 \text{ min}$ 期间道路侵蚀率增加迅速, 5 min 后小流量放水处理侵蚀率随降雨过程的变化基本稳定,当放水流量为 $9.2 \times 10^{-5} \sim 1.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,道路侵蚀率随降雨过程的变化经历两次先增大后减小的过程。在降雨过程中,当路面径流较小时,下切剥蚀能力较弱,路面侵蚀形态通常以面蚀、纹沟、细沟出现。

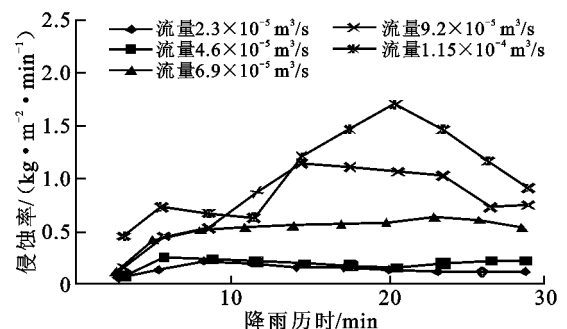


图 1 不同放水流量条件下侵蚀率变化

随着路面汇集径流进一步加大,土壤侵蚀率在加大,汇集径流加大,侵蚀沟下切、侧蚀能力加强,但随着汇集径流淘刷、剥蚀、搬运用能量的消耗,土壤侵蚀率在逐渐减弱,这种变化的结果,导致在整个坡面

侵蚀沟纵坡形态呈锯齿状分布,是一个较为复杂的侵蚀发育变化的过程,但是,它的发生发展仍然受到土壤侵蚀均衡剖面与基准面的影响。

3.1.2 土质道路侵蚀模数随放水流量的变化 图2的土质路侵蚀模数随放水流量的变化过程。统计分析表明,放水流量对道路侵蚀的影响可用幂函数相关方程描述。

$$M = 1.1156Q^{1.3198}, \quad R = 0.9600 \quad (1)$$

式中: M ——侵蚀模数 (kg/m^2); Q ——放水流量 ($10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)。

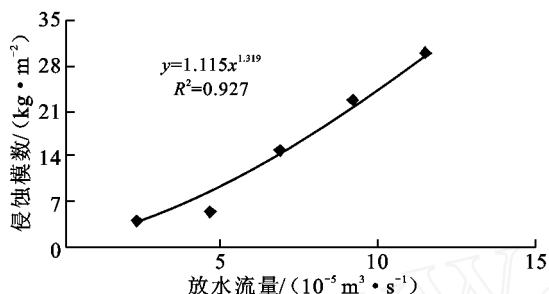


图2 侵蚀模数与放水流量的关系

从图2可以看出道路侵蚀模数放水流量几乎呈直线关系,为幂函数关系。降雨径流是引起道路冲刷的直接动力,造成严重道路侵蚀主要取决于降雨强度和路段上方集水区与道路路面汇集径流的大小,因此,道路侵蚀的防治首先必须有效控制坡面及路面汇集径流的形成,一是设法减少径流,二是设法提高路面抗冲性能。

3.2 植物路降雨+放水组合侵蚀过程

3.2.1 植物路侵蚀率变化过程 在植物路植被覆盖为50%,坡度为 15° , $I = 2 \text{ mm}/\text{min}$ +放水试验条件下,植物路侵蚀率变化过程如图3。在开始产流时植物路侵蚀率都明显较土质路面大,对照图1中土质路面在放水流量为植物路1.64倍的情况下,其开始阶段侵蚀率依然低于植物路,尽管在试验过程中试两种验土槽中土体容重是同样的,在草本栽种过程中,将开沟栽种土体全部返回土槽。但是,由于植物路路面植物在生长过程中,对草种管理及植物生长必然使得种植行内表土一般变得较疏松,这与实际是相符合的。但随着降雨历时的延长,侵蚀率基本上都呈下降的趋势,20 min后侵蚀率基本稳定。在放水流量增大为 5.6×10^{-5} 和 $7.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,植物路侵蚀率随降雨过程的变化变得复杂,特别是当放水流量达到 $7.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 时降雨末期其值又再次增大。

对4个较大放水流量条件下的植物路侵蚀率随降雨过程的变化可用对数函数进行拟合。

3.2.2 植物路侵蚀模数随放水流量的变化 不同放水流量下植物路侵蚀模数随放水流量的变化如图4所示。放水流量对植物路侵蚀的影响可用幂函数描述如下:

$$M = 0.5251Q^{0.6364}, \quad R = 0.99 \quad (2)$$

式(2)及图4表明,植物路侵蚀模数随放水流量增加而增大呈幂函数且高度相关。

与式(1)图2比较,公式(2)中的斜率、指数参数均明显偏低。说明植物起到了明显的防蚀作用,很大程度上降低了放水对道路的侵蚀程度。

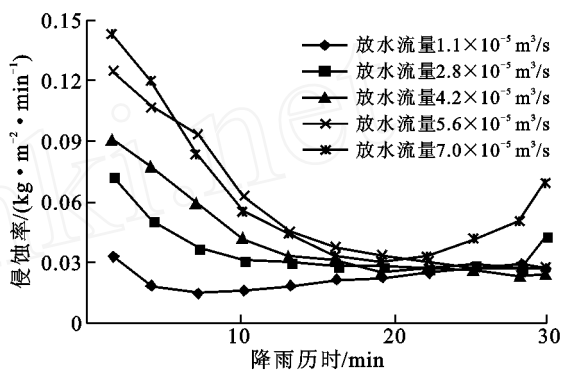


图3 不同流量条件下侵蚀率的变化

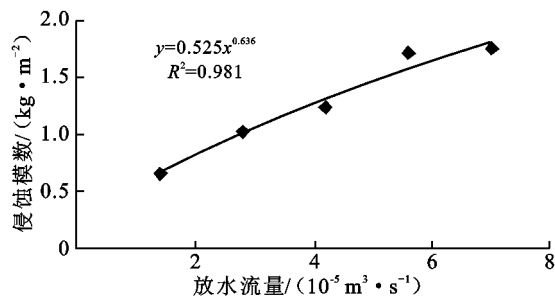


图4 侵蚀模数随放水流量的变化

3.3 植物路防蚀效益

3.3.1 植物路与土质路面径流深对比 根据表1—2试验结果,无论在同一坡度不同降雨条件下,还是在同一降雨条件不同坡度试验条件下,植物路的径流深明显高于土质道路。这种现象与实际也是相符的,在降雨过程中,植物叶片在雨滴的打击、雨水压力及水流的作用下,叶片很快匍匐在路面上,从而形成了有效的保护层,就像顺坡布设的叶面排水槽。这说明采用植物路不仅有效地防止道路路面冲刷,而且有利于路边集水径流的利用,减少路面沙尘污染,有利于改善道路沿线生态环境。在同一坡度不同降雨条件下,在相同雨强条件下植物路的径流深都比土质路的大,特别是在小雨强情况下更加明显。如在雨强为1.0和 $1.5 \text{ mm}/\text{min}$ 时,相对于土质路,植物路径流深增加了341%和261%。而在大雨强时,植物路产

流增加了 32%~51%，幅度有明显降低，整体平均为 144%。在同一降雨强度 ($I = 2.0 \text{ mm/min}$)，5 种不同坡度试验条件下，植物路随坡度增加径流深变化不大，但土质路径流深则有较明显增加，因此，植物路/土质路则随坡度增加有所降低。植物路相对于土质路径流深在 5 级坡度上分别增加了 70%，65%，64%，51%和 43%；平均增加了 58.7%。

表 1 不同雨强条件下植物路和土质路径流深比较

路面特征	不同雨强 (mm/min) 径流深/mm				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
植物路	36.59	78.15	113.44	150.11	178.35
土质路	8.30	21.63	75.23	113.51	130.45
植物路/土质路/%	441	361	151	132	137

表 2 不同坡度条件下植物路和土质路径流深比较

路面特征	不同坡度径流深/mm				
	6°	9°	12°	15°	18°
植物路	119.23	120.58	116.76	113.44	115.53
土质路	70.08	73.08	71.02	75.23	80.61
植物路/土质路/%	170	165	164	151	143

3.3.2 植物路与土质路侵蚀强度比较 从总体上来看，土质与植物路面侵蚀强度均随雨强增加而增大，植物路的降雨侵蚀强度都小于土质路，在同一坡度 (15°) 不同雨强 (1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm/min) 试验条件下，植物路的侵蚀强度分别是土质路的

96.75%，46.82%，97.21%，9.07%，14.03%；植物路相对于土质路侵蚀强度平均减少 47.22%。植物路相对于土质路侵蚀强度的减少率随雨强的增大其变化可用抛物线方程描述

$$Y = 8.2126I^2 + 7.7853I - 5.3049, \quad R = 0.75 \quad (3)$$

式中： Y ——植物路相对于土质路侵蚀强度的减少率 (%)； I ——雨强 (mm/min)。

在相同雨强 ($I = 2 \text{ mm/min}$) 不同坡度 (6°, 9°, 12°, 15°, 18°) 试验条件下，同过对 2 种道路的侵蚀强度随坡度的变化过程进行分析研究。结果表明，植物路的侵蚀强度都比土质路的小，植物路的侵蚀强度分别是土质路的 63.19%，82.39%，83.22%，97.21%，42.78%；相对于土质路侵蚀强度平均减少 26.24%。其减少率随坡度的增大表现为先下降后上升，并可用抛物线方程描述

$$Y = 1.0643S^2 - 24.675S + 149.94, \quad R = 0.87 \quad (4)$$

式中： Y ——植物路相对于土质路侵蚀强度的减少率 (%)； S ——坡度 (°)。

3.3.3 植物路与土质路径流的含沙量比较 以坡度 15°， $I = 2.0 \text{ mm/min}$ 条件下 2 种道路产流含沙量随降雨过程的变化为例，图 5 显示植物路、土质路产流含沙量随降雨过程的变化过程。整个降雨过程中，任一时刻植物路的产流含沙量都比土质路的产流含沙量小的多，两种道路产流含沙量的差异在产流初期相对较小，随后相对较大，表明产流初期植物路相对于土质路减沙作用的差异较小，随后差异增大。

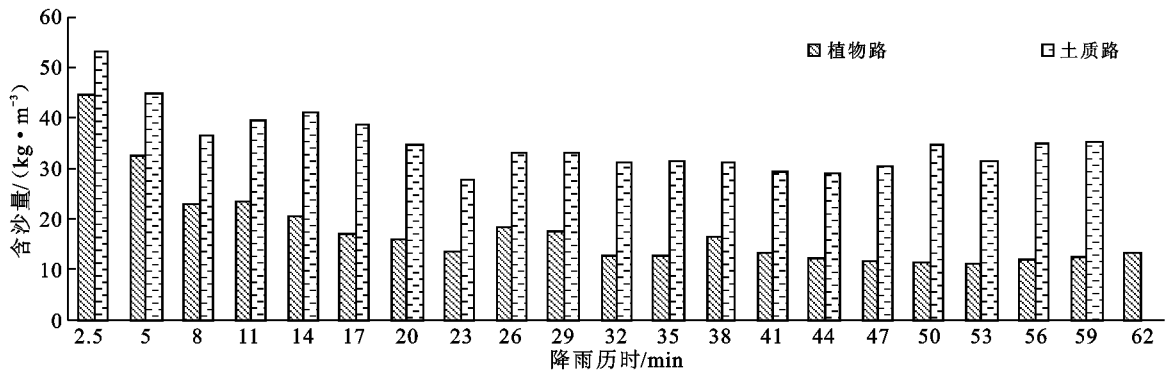


图 5 植物路与土质路降雨产流含沙量随降雨过程的变化

4 结论

(1) 在降雨 + 放水冲刷条件下，植物路侵蚀率开始较大，随后逐渐衰减，可用对数函数进行描述；土质路侵蚀率尽管可用对数函数进行描述，但在大流量放水条件下呈现非稳定现象；两种路面侵蚀强度与放水流量均呈现很好幂函数关系，且植物路具有明显防蚀作用。

(2) 在相同条件下植物路的次降雨产流径流深都比土质路的大，当雨强分别是 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm/min 时，植物路相对于土质路径流深平均增加 144.1%，其增加率随雨强的增大而减小，并可用幂函数方程描述；当坡度分别是 6°, 9°, 12°, 15°, 18° 时，植物路相对于土质路径流深平均增加 58.7%，其增加率随坡度的增大而下降，并可用直线方程描述。

(下转第 105 页)

过实例分析得出,利用所研发的生态信息表达方法,可以直观、便捷、深刻反映复杂的生态景观要素的变化,能全面系统地反映出生态信息在时空尺度上的分布特征与变化规律,也是生态信息研究的新思路与新途径。

[参 考 文 献]

- [1] 陈述彭. 地学信息图谱刍议[M]// 陈述彭. 地学的探索. 6卷. 北京:科学出版社,2003:200-203.
- [2] 齐清文. 池天河. 地学信息图谱的理论和方法[J]. 地理学报, 2001, 56(S): 8-18.
- [3] 齐清文. 黄土高原地貌形态信息图谱[J]. 地理学报, 2001, 56(S): 32-37.
- [4] 陈毓芬, 廖克. 中国自然景观综合信息图谱研究[J]. 地球信息科学, 2003(3): 97-102.
- [5] 张百平, 周成虎, 陈述彭. 中国山地垂直带信息图谱的探讨[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 163-171.
- [6] 程维明, 柴慧霞, 龙恩. 中国 1:100 万景观生态制图设计[J]. 地球信息科学, 2004, 6(4): 19-24.
- [7] 傅肃性, 傅俏燕. 基于知识的空间图像专题分析与制图[J]. 地理学报, 2001, 56(S): 98-102.
- [8] 廖克. 现代地图学的最新进展与新世纪的展望[J]. 测绘科学, 2004, 29(1): 5-9.
- [9] 赵军, 胡自治. 从生态信息图谱的角度看草原综合顺序分类法检索图[J]. 草原与草坪, 2005(2): 12-14.
- [10] 全斌, 廖克. 基于知识的厦门市生态环境遥感系列制图[J]. 地球信息科学, 2005, 25(1): 122-130.
- [11] 齐清文. 地学信息图谱的最新进展[J]. 测绘科学, 2004, 29(6): 15-23.
- [12] 程维明, 柴慧霞, 龙恩. 中国 1:100 万景观生态制图设计[J]. 地球信息科学, 2004, 6(4): 19-24.
- [13] 张慧芝, 彭茹燕, 王让会. 干旱区景观生态制图的谱型特性与模式方法[J]. 地球信息科学, 2003(2): 20-22.
- [14] 王让会, 张慧芝, 游先祥. 塔里木河流域景观生态格局的遥感信息提取与分析[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 43-47.
- [15] 张翀, 李晶, 任志远. 基于 Landsat TM 的西安地区土地利用变化与图谱研究[J]. 水土保持通报, 2008, (4): 157-162.
- [16] 刘梦云, 李宝宏, 王锐, 等. 基于 RS 和 GIS 的小型城市土地利用动态分析:以杨凌示范区为例[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 38-40.
- [17] 张新长, 艾廷华. 专题地图地理底图数据库的结构设计[J]. 测绘通报, 1994(5): 30-33.

(上接第 10 页)

(3) 在相同条件下植物路的次降雨侵蚀强度都比土质路的小,当雨强分别是 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm/min 时,植物路相对于土质路侵蚀强度分别减少 3.25%, 53.18%, 2.79%, 90.93%, 85.97%, 平均减少 47.22%, 表明植物路相对于土质路起到了较好的防蚀作用,其减少率随雨强的增大先增加后减小,并可用抛物线方程描述;当坡度分别是 6°, 9°, 12°, 15°, 18° 时,植物路相对于土质路侵蚀强度分别减少了 36.81%, 17.61%, 16.78%, 2.79%, 57.22%, 平均减少 26.24%, 其减少率随坡度的增大表现为先下降后上升,并可用抛物线方程描述。

(4) 在相同条件下植物路的次降雨产流平均含沙量都比土质路的平均含沙量小,当雨强分别为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm/min 时,植物路相对于土质路平均含沙量分别减少了 88.47%, 89.39%, 45.05%, 92.38%, 91.03%, 平均减少 81.26%, 表明植物路的减沙作用远大于其减水作用,其减少率随雨强的增大呈抛物线规律先递增再递减;当坡度分别为 6°, 9°, 12°, 15°, 18° 时,植物路相对于土质路平均含沙量分别减少了 59.68%, 50.98%, 33.33%, 45.05%, 53.05%, 平均减少 48.41%, 表明植物路的减沙作用

显著,其减少率随坡度的增大呈抛物线规律先递减再递增;在坡度 15°, 雨强 2.0 mm/min 条件下,整个降雨过程中的任一时刻,植物路的产流含沙量都明显小于土质路的产流含沙量,两种道路产流含沙量的差异在产流初期相对较小,以后相对较大,表明产流初期植物路相对于土质路减水减沙作用的差异较小,随后差异较大,且减沙作用大于减水作用。

[参 考 文 献]

- [1] 郑世清, 霍建林, 李英. 黄土高原山坡道路侵蚀与防治[J]. 水土保持通报, 2004, 24(1): 46-48.
- [2] 郑世清, 郑科. 延安黄土区植物路植物根系与水保功能评价研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 174-176.
- [3] 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.
- [4] 曹世雄, 陈莉, 高旺盛. 山区农田道路路面种草生长发育与通行能力观测[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 69-72.
- [5] 田风霞, 王占礼, 郑世清, 等. 黄土道路侵蚀过程模拟试验研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 1-4, 9.
- [6] 徐学选, 琚彤军, 郑世清, 等. 黄土丘陵区次降雨下的山坡道路侵蚀特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(S): 574-578.