

黄丘区野外坡面产流产沙过程对不同植被覆盖结构的响应

秦东远^{1,2}, 肖培青², 郝仕龙¹, 杨春霞²

(1. 华北水利水电大学资源环境学院, 郑州 450045;

2. 黄河水利科学研究院, 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003)

摘要: 植被覆盖结构是影响坡面侵蚀过程的重要因素, 通过在黄丘区罗玉沟流域开展自然植被覆盖坡面野外模拟降雨试验, 分析了 90 mm/h 雨强条件下地下根系、地下根系+地表结皮层和地下根系+地表结皮层+植被冠层 3 种不同覆盖结构对坡面产流产沙过程影响。结果表明: 植被根系层次对增强土壤入渗起主导作用, 使土壤入渗量增加 67%, 稳定入渗率增加 39.7%; 3 种植被覆盖结构中, 地表结皮层对产流和产沙具有最好的调控作用, 减流贡献率和减沙贡献率分别为 43% 和 67%; 根系小区和裸地小区累积产流量与累积产沙量之间呈幂函数关系, 随着植被覆盖结构的叠加, 累积产流量与累积产沙量之间呈线性函数的关系; 多层次植被覆盖结构能够延长坡面侵蚀过程的发育期, 缩短活跃期。研究结果对定量评价植被措施的减水减沙作用具有重要意义。

关键词: 植被覆盖结构; 产流产沙; 野外坡面; 黄丘区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0073-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.012

Response of Slope Runoff and Sediment Yield to Different Vegetation Cover Structures in the Loess Hilly Region

QIN Dongyuan^{1,2}, XIAO Peiqing², HAO Shilong¹, YANG Chunxia²

(1. School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045; 2. Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau of Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003)

Abstract: Vegetation cover structure is a key factor affecting slope erosion process. Based on the simulated rainfall experiment carried out on a slope covered by natural vegetation in Luoyugou watershed of loess hilly region, the effects of three different cover structures on slope runoff and sediment yield were studied under the condition of 90 mm/h rainfall intensity. These three cover structures included the underground root system, the underground root system plus the surface crust, as well as the combination of underground root system, the surface crust and the vegetation canopy. The results were as follows: (1) The root system of the vegetation played a leading role in enhancing soil infiltration, the amount of soil infiltration and the steady infiltration rate on the vegetation root slope increased by 67% and 39.7%, respectively, compared with those on bare slope. (2) For the three vegetation cover structures, the surface crust had the best regulation effect on the runoff and sediment yield, and the contribution rate of runoff reduction and sand reduction was 43% and 67%, respectively. (3) There was a power function relationship between the accumulative runoff yield and accumulative sediment yield in the vegetation root plot and the bare plot, and the relationship turned out to be linear function with the superposition of vegetation cover structure. (4) The multi-level vegetation cover structure could prolong the development period and shorten the active period of the slope erosion process. The research results were important for quantitative evaluation of the effects of vegetation measures on water and sediment reduction.

Keywords: vegetation cover structure; runoff and sediment yield; field slope; loess hilly region

收稿日期: 2018-08-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571276, 41701326); 河南省创新型科技人才队伍建设工程项目(162101510004); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2016-33)

第一作者: 秦东远(1992—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀模拟与监测研究。E-mail: dongyuanqin16@163.com

通信作者: 肖培青(1972—), 女, 博士, 教授级高工, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: peiqingxiao@163.com

2000 年以来实施的生态修复等植被恢复措施使区域下垫面发展为多层次的天然草被覆盖结构,开展不同层次植被覆盖的水土保持功能研究,是揭示植被对产流产沙作用机制的关键科学问题之一。国内外学者围绕植被覆盖的水土保持功效开展了大量的研究工作,并取得了丰富的成果^[1-6];有从水动力学参数角度研究植被与坡面侵蚀的响应关系^[7-9];也有不少学者针对不同下垫面条件坡面入渗及产流产沙规律开展了大量研究。于国强等^[10]研究了不同植被类型的侵蚀产沙、径流、地表糙度和入渗规律以及相关关系;李强等^[11]研究了坡面不同植被格局对入渗、产流产沙的影响,表明不同植被格局能够影响坡面植被的减沙减蚀作用;曹梓豪等^[12]研究了不同盖度植被对坡面产沙过程的影响,表明不同植被盖度下坡面径流系数随冲刷历时增加而增加;杨坪坪等^[13]通过室内模拟径流冲刷试验,研究了不同植被空间配置模式的坡面水动力学特性,表明植被的配置对坡面流体力学参数有显著影响。现有的研究成果多集中于室内试验或野外人工种植草被进行模拟降雨试验,野外自然植被覆盖坡面侵蚀产沙规律研究还较少。常规植被覆盖度指标掩盖了覆盖的层次结构性特征,不同植被覆盖结构对产流产沙的影响的研究还亟需加强。鉴于此,本文选择野外坡面进行模拟降雨试验,研究不同植被覆盖结构对坡面产流产沙过程的影响,以期对定量评价植被减蚀作用提供科学依据。

1 试验概况与设计

1.1 野外试验区概况

试验区位于甘肃省天水市北郊的罗玉沟流域下游,海拔 1 500 m,属于黄土丘陵沟壑区第三副区,具有典型的黄土丘陵地形地貌。流域内的主要土壤类型为褐土、红黏土和黑垆土,土壤质地疏松多孔易板结,可耕性良好,结持力小,抗侵蚀能力差。2016 年新建了 10 个坡度为 15°的野外试验区,径流小区长 10 m、宽 2 m,其中有 9 个植被自然覆盖小区和 1 个裸地对照小区。试验小区土壤容重为 1.31 g/cm³,孔隙比为 1.05。植被覆盖小区内的植被类型为以龙须草、小冠花为主,伴有少量蒿类等草本植物,均为当地原生的典型自然植被。龙须草平均株高 38 cm,主根长 18 cm,小冠花平均株高 20.6 cm,主根长 78 cm。在小区内选择典型样方,通过传统网格法、数码相机、多光谱相机照片提取小区植被覆盖度。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 7—9 月进行,试验包括地下根系层次、地表结皮层次和植被冠层 3 种覆盖层次结构,

地表 0—5 cm 内的绒草、植被枯落物和地表结皮统称为结皮层;5 cm 以上为植被冠层。图 1 中原状小区为全覆盖小区,覆盖结构为地下根系+地表结皮层+植被冠层;结皮层小区是将全覆盖小区剪除植被冠层后处理形成,覆盖结构包括地下根系层+结皮层;根系小区是将地表及地上的所有植被冠层、绒草及枯枝落叶全部清除,只保留植被地下根系。图 1 中 1,2,3 号小区为全覆盖小区,4,5,6 号小区为结皮层小区,7,8,9 号小区为根系小区,同时以 10 号天然裸地小区作为对照试验。每个小区内取 3 个 30 cm×30 cm 样方,分别称量剪除的植被冠层、地表结皮层和地下根系的鲜重、泡水重和烘干后的重量,以获植被不同层次的持水量。

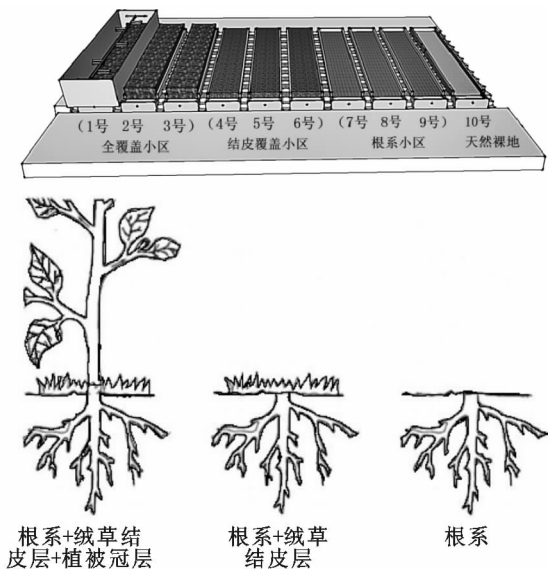


图 1 径流小区布设及 3 种植被覆盖结构示意图

1.3 试验装置

野外模拟试验降雨器采用 QYJY-501 型下喷式降雨系统,主要组成部件包括主控器、水泵、多孔径喷头、雨量计、可接收并分析数据的移动终端,通过 5 组不同孔径喷头搭配实现不同的雨强雨量调节。降雨过程中的雨强雨量等参数会通过雨量计反馈到移动终端上,通过移动终端的操控实现降雨数据的实时监测、反馈和调节。降雨器喷头距土壤表面距离 6 m,实测雨强、雨滴粒径和雨滴落速较天然降雨有 80% 相似度。为保证试验降雨参数的准确性,在降雨系统上安装了激光雨滴谱仪,监测降雨的雨滴落速、粒径大小和雨强,并与降雨系统的移动终端数据进行对比参照和修正。

1.4 试验过程与数据采集

试验开始前一天,测量试验小区内的土壤表层体积含水率,采用适当延后试验或适量喷水的方法使每次试验前的土壤表层含水量保持在 20% 左右。在小

区坡面自上而下每 2 m 用细绳作为标识将小区分隔成 5 个断面。开始降雨前升起防风网,最大程度减小风力过大对试验结果产生的影响。用雨布将小区覆盖,对雨强进行率定,待雨强稳定后掀开雨布进行降雨试验,降雨后待全坡面产流时记录产流时间,同时用染色剂示踪法对流速进行测量。根据当地降雨频次及降雨时长监测数据分析并参考相关研究^[14],控制每场试验降雨历时为 60 min,采样间隔为 2 min,利用径流桶收集径流泥沙样,每次试验接取 30 个径流泥沙样品。试验结束时根据设定的降雨历时和径流泥沙样品达到基本稳定进行综合确定,关闭降雨器后记录坡面上水流的滞留时间。待试验结束后,经过径流测量—沉淀—烘干—泥沙称重过程和取样烘干称重过程,分别获得产流量和产沙量数据。根据试验数据结果分析,对每种覆盖结构的坡面进行至少 2 次重复试验。

2 结果与分析

2.1 不同植被覆盖结构坡面入渗过程

土壤入渗性能对土壤产流产沙过程有重要影响。本文在已有入渗率公式^[15]计算基础上加入植被持水量参数对其进行修正,修正后的公式为:

$$f_c(t) = R \cos \alpha - 10V / [(t_{i+1} - t_i)S] - Q_{\Delta t}, (t > t_p)$$

式中: f_c 为降雨入渗率 (mm/min); R 为降雨强度 (mm/min); α 为坡面坡度 (°); V 为各时段对应的产流量 (mL); t_i, t_{i+1} 为各时段始末时间 (min); S 为坡面面积 (cm²); Q 为单位面积内的植被持水量 (mm)。

结合表 1 的基本入渗参数和图 2 可以看出,在满足土壤初始含水率和雨强基本一致的条件下,不同被覆结构坡面的降雨入渗过程存在明显差异,在降雨初期(0~15 min)各小区的入渗率均呈下降趋势。从整个入渗过程来看,坡面入渗率均随着降雨的持续逐渐降低,最后趋于平稳。除全覆盖小区外,其他各个小区的入渗过程都有明显的波动,并且达到稳定入渗的时间也不同。全覆盖小区在降雨后 24 min 率先达到稳渗状态,稳渗用时最短,稳定入渗率也最大,达到 0.84 mm/min;天然裸地小区的稳渗用时最长为 54 min,并且稳定入渗率最小,仅为 0.43 mm/min;根系小区在整个入渗过程中的入渗率和累积入渗量均明显大于裸地小区(图 3)。说明根系能够增加土壤的入渗量,增强土壤的入渗能力。结皮小区和全覆盖小区以及根系小区的土壤入渗率总体上相差不大,累积入渗量上也相对接近,说明植被的地上部分对土壤的入渗性能的影响远小于植被根系对土壤入渗性能的影响。随着植被覆盖结构的完善,土壤的入

渗性能得到增强,植被削减入渗波动的能力也得到增强。根系层使土壤稳定入渗率增加了 67%,入渗量增加 39.7%;结皮层使土壤稳定入渗率增加 23%,入渗量增加 16%;植被冠层使土壤稳定入渗率和入渗量分别增加 4%和 8%。根系层对土壤入渗性能的影响最大,结皮层次之。裸地小区的产渗比达到 1.57,约为全覆盖小区产渗比的 2.7 倍,根系小区和结皮小区产渗比与全覆盖小区产渗比差值分别为 0.25 和 0.08,可见坡面植被覆盖结构越完善,坡面对径流的调控作用越强。

表 1 不同植被覆盖结构坡面入渗参数特征

植被类型	初始入渗率/ (mm · min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm · min ⁻¹)	平均入渗率/ (mm · min ⁻¹)	稳渗 用时/min	产渗比
天然裸地	1.04	0.43	0.58	52	1.57
根系小区	1.17	0.72	0.80	44	0.83
结皮小区	1.29	0.82	0.89	40	0.66
全覆盖小区	1.38	0.84	0.94	24	0.58

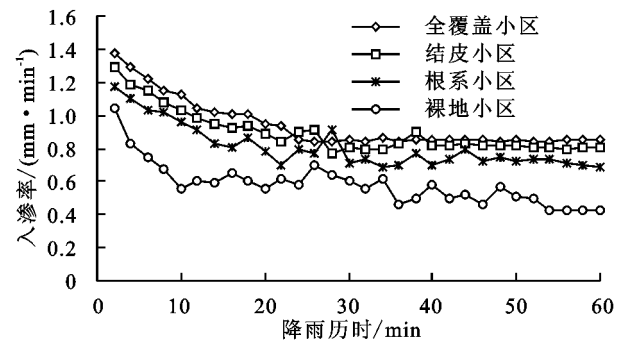


图 2 不同植被覆盖结构坡面入渗率变化过程

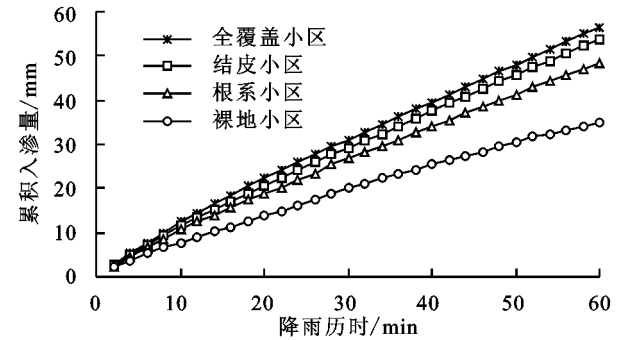


图 3 不同植被覆盖结构坡面累积入渗量

2.2 不同植被覆盖结构坡面产流过程

坡面径流初始产流时间是衡量坡面入渗和产流过程的重要因素^[16-21],试验坡面初始产流时间结果见表 2,全覆盖小区初始产流时间最长,约为天然裸地小区初始产流时间的 4 倍;结皮覆盖小区初始产流时间约为裸地小区的 3 倍;根系小区初始产流时间约为裸地小区的 1.5 倍。植被覆盖结构越完善,坡面的初始产流时间越长,产流越慢。植被覆盖结构完善的坡面入渗作用增强,同时植被对水流具有一定的拦蓄作用和持水作用,也使初始产流时间变长。

表 2 不同植被覆盖结构坡面径流参数特征

小区 类型	初始产流 时间/s	滞流 时间/s	坡面 产流量/L	减流 效果/%
裸地小区	90	40	376.80	—
根系小区	140	66	312.44	17
结皮小区	264	134	151.34	60
全覆盖小区	365	143	111.53	70

图 4 为不同植被覆盖结构下坡面径流过程。在降雨初期,全覆盖坡面和结皮覆盖坡面的径流量都较小,随着降雨历时的延长,径流量略有增加,最后趋于平稳;全覆盖小区产流量在 30 min 时达到稳定状态,结皮覆盖小区在 40 min 达到稳定状态,早于根系小区和天然裸地。根系小区和天然裸地在径流过程中都出现明显的波动情况,其中裸地小区在产流 6 min 时开始呈波动变化,波动程度也最为剧烈,波动范围为 3.20~7.75 L/min;根系小区发生波动的时间较天然裸地延迟了 10 min 左右,根系小区的波动程度小于天然裸地的波动程度;波动范围为 3.30~7.45 L/min,说明在失去植被冠层和结皮层的植被覆盖后,坡面的产流过程并不稳定。全覆盖小区的径流量小且过程最为平稳,维持在 5 L/min 以内。全覆盖小区的产流量与结皮小区的产流量相差不大,说明植被冠层对产流过程的调控作用较弱。对比结皮小区和根系小区的径流过程,发现结皮小区产流量明显减小且产流过程更平稳,说明地表结皮层具有较好的减流作用和稳流作用。从产流量来看,天然裸地的产流量为全覆盖小区的 3.5 倍左右,约为结皮小区的 2.5 倍,约为根系小区的 1.2 倍。

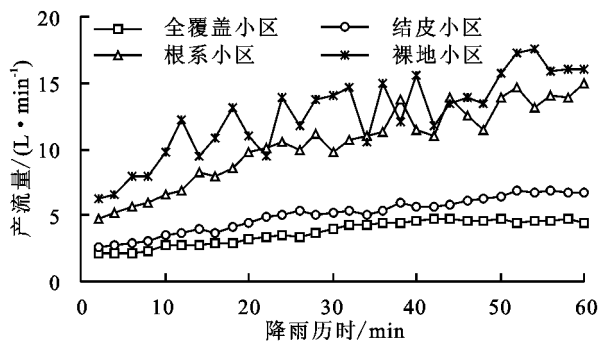


图 4 不同植被覆盖结构坡面径流过程

根系小区和天然裸地对坡面径流的调节能力较差,根系小区与天然裸地相比,地下根系更丰富更密集,且为有生物活性的鲜根,改善了坡面的地表环境,在一定程度上增强了土壤入渗,延缓了坡面径流过程,减少了坡面径流量。全覆盖小区和结皮覆盖小区的产流过程相当稳定,无明显波动,由于地表的结皮层和植被冠层能够对降雨进行拦截和削减,延缓了地表径流过程。对比 4 种坡面在降雨停止后的滞流时

间,可以发现植被的地上部分尤其是地表结皮层内部的枯落物对降雨径流具有较好的截留、拦蓄和过滤作用,减少了地表径流量。以天然裸地径流量作为参照,根系小区的减流效率为 17%,结皮小区的减流效率为 60%,全覆盖小区减流效率为 70%。以天然裸地在相同雨强条件下的产流量为基数,不同植被覆盖结构下坡面产流量进行对比分析,计算不同植被覆盖结构的减流贡献率。研究结果表明,地下根系层、地表结皮层、植被冠层的减流作用贡献分别为 17%、43%和 10%。因而,径流过程中植被地表结皮层发挥的减流作用最大,根系层次之。

2.3 不同植被覆盖结构坡面产沙过程

从图 5 可以看出,天然裸地的产沙过程波动程度最为强烈,波动范围为 65~137 g/min,且产沙量也一直维持在较高水平。根系小区的产沙过程也出现波动,但没有天然裸地小区波动剧烈,波动范围为 66~105 g/min。波动的时间较天然裸地延缓了 15 min 左右。根系小区的产沙量较天然裸地有明显减少且相对稳定。全覆盖小区和结皮覆盖小区的产沙过程平稳,全覆盖小区和结皮覆盖小区的产沙量和产沙过程相差不大,都无明显的突变和波动,表明植被冠层对产沙量的影响不是十分明显。天然裸地的产沙量约为全覆盖小区的 8.8 倍,约为结皮覆盖小区的 7.0 倍,约为根系小区的 1.5 倍。

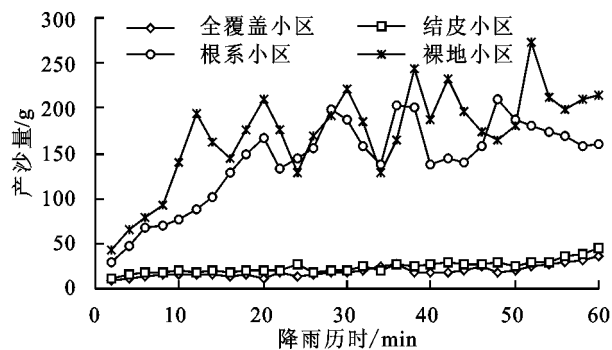


图 5 不同植被覆盖结构坡面产沙过程

裸地小区和根系小区的表层土壤侵蚀情况相对强烈且不稳定,呈现出随着侵蚀发育过程而波动增加的趋势。在相同降雨强度下,天然裸地的人渗性能和土壤稳定性较其他小区较差,没有植被冠层和地表结皮层对降雨的拦截和削减作用,在降雨时表层土壤的破坏程度最为剧烈,伴随着坡面表层的侵蚀发育产沙量出现交替的波段式增长现象。根系小区较天然裸地的区别在于根系小区内有密集的具有生物活性的根系,增强了土壤的稳定性和入渗性能。根系小区在径流过程中产沙量虽然也出现波动式的增长,但波动程度明显小于天然裸地。通过表 3 可以看出,天然裸

地的坡面产沙量为 10.2 kg,根系小区坡面产沙量为 8.5 kg,结皮小区坡面产沙量为 1.4 kg,全覆盖小区坡面产沙量为 1.1 kg。地表结皮层由于内部的枯落物层能够有效减少降雨形成的溅蚀。此外,结皮层对径流起到截留和拦蓄作用,降低了水流流速,使水流携沙能力下降,结皮层及其内部的枯落物对水流起到很好的过滤作用,拦截了部分泥沙,最终使产沙量减少。与天然裸地相比,全覆盖坡面的减沙效率为 89%,结皮小区和根系小区的减沙效率分别为 85%和 18%。在地下根系、地表结皮和植被冠层 3 种层次中,结皮层减沙贡献率为 67%,地下根系层和植被冠层的减沙贡献率分别为 18%和 4%。可见在产沙过程中,植被的结皮层次发挥的减沙作用最大,根系层次之。在试验条件下,植被覆盖结构的层次越复杂,产沙量和产流量就会越少。

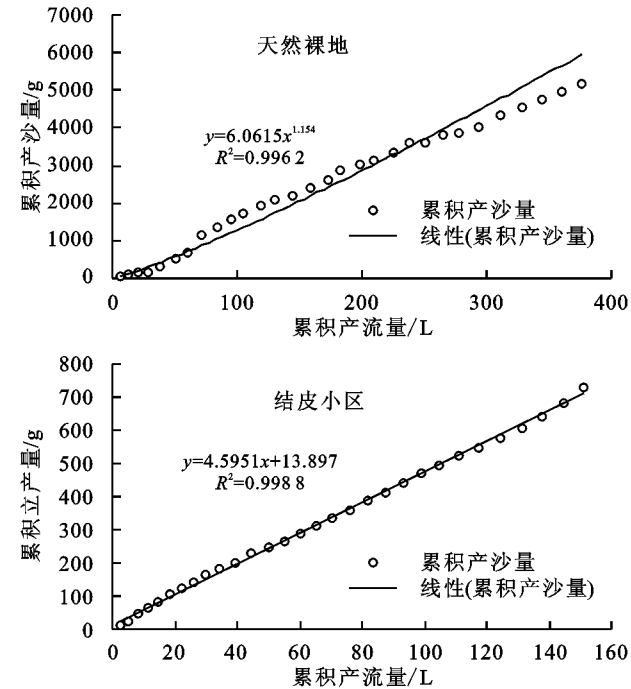


图 6 不同坡面的累积产流量与累积产沙量关系

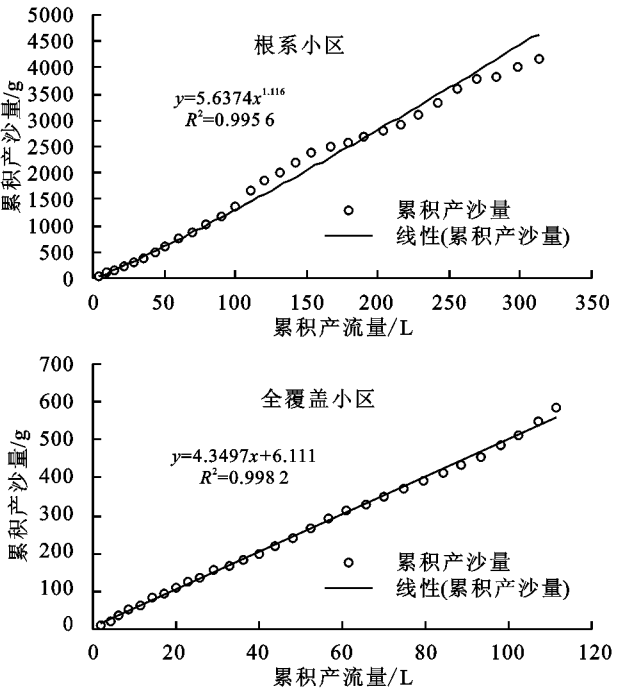
通过对累积产流量与累积产沙量变化过程和波动幅度进行分析,发现天然裸地和根系小区累积产流产沙量具有明显的突变点,天然裸地小区的突变起始时间为 16 min;根系小区的突变起始时间为 28 min,较天然裸地小区滞后了 12 min。天然裸地在 44 min 时再次发生突变,根系小区在 40 min 时也再次突变,较裸地小区提前 4 min。于国强等^[22]将第 1 次突变所对应的时间视为活跃期的起点,第 2 次突变的时间视为活跃期结束时间。将整个天然裸地和根系小区的降雨过程分为侵蚀发育期、活跃期和稳定期,可知根系小区的发育期较天然裸地延长 12 min,根系小区的活跃期较天然裸地缩短了 14 min,提前进入稳定期。而全覆盖小区和结皮小区在整个降雨过程

表 3 不同植被覆盖结构坡面产沙特征

小区类型	裸地小区	根系小区	结皮小区	全覆盖小区
产沙量/kg	10.2	8.5	1.4	1.1
减沙效果/%	—	18	85	89

2.4 不同覆盖结构坡面水沙关系

图 6 为不同覆盖结构坡面累积产流量与累积产沙量的函数拟合关系,天然裸地和根系小区的累积产流量与累积产沙量之间呈 $y = Ax^B$ 幂函数关系,全覆盖小区和结皮覆盖小区的累积产流量与累积产沙量之间呈 $y = Ax + C$ 线性函数关系。同时对比天然裸地和根系小区的拟合关系图,发现天然裸地的 B 值为 1.154,根系小区的 B 值为 1.116。根系小区的 B 值更接近于 1,即更接近于线性函数,由此可以通过 4 种坡面的累积产流量与累积产沙量的关系得出:随着植被覆层次结构的叠加,坡面的累积产流量与累积产沙量的函数关系越来越接近线性函数。



中都没有明显的波动和突变情况,可视为突变点延长,在试验降雨历时内并未发生,随着降雨继续进行,全覆盖小区和结皮小区也可能会出现突变点,即结皮小区和全覆盖小区在试验降雨历时内一直处于发育期。随着植被覆结构的叠加和完善,坡面侵蚀的发育期越来越长,活跃期越来越短,即植被覆盖结构的叠加能够延长发育期,缩短活跃期并使坡面侵蚀提前进入稳定期。其中根系使坡面发育期较天然裸地延长 62.5%,活跃期缩短 46.1%。

3 结论

(1)在地下根系、地表结皮层和植被冠层 3 种覆盖结构的不同层次中,对入渗过程影响作用大小顺序为地下根系层>地表结皮层>植被冠层,地下根系层

对增强土壤入渗起主导作用。

(2)地下根系层减流和减沙贡献率分别为 17%和 18%;地表结皮层减流和减沙贡献率分别为 43%和 67%;植被冠层减流和减沙贡献率分别为 10%和 4%。地表结皮层减流减沙效果最明显,对产流和产沙具有最好的调控作用。3 种植被覆盖结构减流减沙能力大小顺序为地表结皮层>地下根系层>植被冠层。

(3)植被覆盖结构越复杂,坡面产流产沙过程越稳定,发生突变的时间越晚,突变过程越短,突变幅度越小。

本文在现有的条件下对不同覆盖结构坡面侵蚀产沙过程进行了探讨,还有待结合更多的试验观测,进一步揭示不同植被种类等因素对植被减蚀作用的复杂响应机制。

参考文献:

- [1] Carroll C, Merton L, Burger P, et al. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines[J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38(2): 313-327.
- [2] Loch R J. Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulation rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland[J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38: 299-312.
- [3] 张光辉,梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 104-110.
- [4] 余新晓,张晓明,武思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26.
- [5] 姚文艺,肖培青,申震洲,等. 坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应关系[J]. 水利学报, 2011, 42(12): 1438-1444.
- [6] 温仲明,焦峰,刘宝元,等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 21-25.
- [7] 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 74-80.

- [8] 肖培青,姚文艺,申震洲,等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 232-237.
- [9] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 825-834.
- [10] 于国强,李占斌,张霞,等. 野外模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 10-14.
- [11] 李强,李占斌,尤洋,等. 植被格局对坡面产流产沙影响的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(5): 31-34.
- [12] 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.
- [13] 杨坪坪,张会兰,王玉杰,等. 刚性植被空间配置模式对坡面流水动力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 90-95.
- [14] 肖培青,姚文艺,牛光辉,等. 不同下垫面条件下坡面蓄水保土效益试验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 65-68.
- [15] 陈洪松. 黄土区坡地土壤水分运动与转化试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2003: 32-33.
- [16] 李林,赵允格,王一贺,等. 不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1013-1023.
- [17] 张玉斌,郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 5-10.
- [18] 朱永杰,毕华兴,常译方,等. 90%盖度狗牙根草地对次降雨径流削减作用[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(10): 103-109.
- [19] 程圣东,李鹏,李聪,等. 降雨-植被格局耦合作用对坡沟系统水沙特征影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(2): 230-241.
- [20] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 24-29.
- [21] 常玉,余新晓,陈丽华,等. 模拟降雨条件下林下枯落物层减流减沙效应[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 69-74.
- [22] 于国强,李占斌,李鹏,等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 593-599.

(上接第 72 页)

- [22] 马笑,朱首军. 黄土丘陵沟壑区梯田地埂土壤崩解特性试验研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(4): 21-25.
- [23] 桂劲松,康海贵. 结构可靠度分析的响应面法及其 Matlab 实现[J]. 计算力学学报, 2004, 21(6): 683-687.
- [24] 张晓媛,范昊明,杨晓珍,等. 容重与含水率对砂质黏壤土静水崩解速率影响研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 214-218.

- [25] 邱陆畅,张丽萍,陆芳春,等. 基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 74-79.
- [26] 吴淑安,蔡强国,靳长兴. 内蒙古东胜地区土壤抗蚀性实验研究[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10(2): 38-45.
- [27] 魏朝富,高明. 有机肥对紫色水稻土水稻性团聚体的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(3): 114-116.