

# 植物纤维毯道路边坡防护技术综合效益评价

刘宏远<sup>1</sup>, 刘亮<sup>3</sup>, 李秀军<sup>1</sup>, 张科利<sup>2</sup>, 罗建勇<sup>2</sup>, 王静<sup>2</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102;

2. 北京师范大学, 地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为系统评价植物纤维毯水土保持作用对不同雨强的响应以及改良土壤的作用, 开展了人工模拟降雨试验和野外小区监测, 在模拟降雨试验中, 设计4个雨强, 测试3种植物纤维毯, 降雨历时均为60 min。在降雨过程中以5 min为间隔收集径流泥沙, 并测定径流量和侵蚀泥沙量。在野外小区监测中, 通过2007、2010、2013年施工的稻草毯小区, 以及2014年施工的椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻草毯小区, 评价土壤理化性质对植物纤维毯铺设年限和类型的响应差异。结果表明: 在47 mm/h及以上雨强下, 椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻草毯均能有效减少侵蚀和产流, 平均减蚀效益分别为94.92%、86.06%、83.42%, 平均减流效益分别为31.59%、45.02%、52.44%, 减蚀效益显著优于减流效益。3种植物纤维毯均在47 mm/h雨强下减蚀效益和减流效益达到最高, 其中最高减蚀效益为椰丝毯(97.54%), 最高减流效益为椰丝稻草混合毯(88.26%)。随着雨强增大, 减蚀效益和减流效益均不同程度降低, 且减流效益降低更快。随着植物纤维毯铺设年限延长, 土壤理化性质逐渐改善; 铺设1年后, 椰丝稻草混合毯改土效果最佳。

**关键词:** 植物纤维毯; 水土保持; 土壤改良; 效益评价

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0345-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.054

## Comprehensive Benefit Evaluation on the Protection Technique of Plant Fiber Blanket on the Road Side Slope

LIU Hongyuan<sup>1</sup>, LIU Liang<sup>3</sup>, LI Xiujun<sup>1</sup>, ZHANG Keli<sup>2</sup>, LUO Jianyong<sup>2</sup>, WANG Jing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the

Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** In order to systematically estimate the effects of plant fiber blanket on soil and water conservation under different rainfall intensities and on soil amelioration, simulated rainfall experiments and field monitoring were conducted. In the simulated rainfall experiments, four rainfall intensities were set up and three types of plant fiber blankets were tested. The designed rainfall duration was 60 min. During the rainfall, runoff and sediment were collected every 5 min, of which the runoff volume and sediment yield were measured. In the field monitoring, three plots covered with straw blanket which were constructed in 2007, 2010 and 2013, respectively, and another three plots covered with coir blanket, mixed coir-straw blanket and straw blanket, respectively, which were constructed in 2014, were used to estimate the effects of the plant fiber blanket type and the time after constructed on soil's physical and chemical properties. The results showed that under 47 mm/h and above rainfall intensities, coir blanket, mixed coir-straw blanket and straw blanket could effectively reduce erosion and runoff, and the average soil loss reduction benefit was 94.92%, 86.06% and 83.42%, respectively, and runoff was reduced by 31.59%, 45.02% and 52.44%, respectively. This indicated that the efficiency of erosion reduction was apparently better than that of runoff reduction. The three kinds of plant fiber blankets had the highest effect of reducing erosion and runoff under 47 mm/h

收稿日期: 2018-08-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471224, 41730748); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-112)

第一作者: 刘宏远(1988-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持及盐碱地土壤改良研究。E-mail: liuhongyuan@iga.ac.cn

通信作者: 张科利(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: keli@bnu.edu.cn

rainfall intensity. The highest erosion reduction efficiency was coir blanket (97.54%), and mixed coir-straw blanket had the highest runoff reduction efficiency (88.26%). With the increasing of rainfall intensities, both the efficiencies of erosion reduction and runoff reduction decreased, and the efficiency of runoff reduction decreased faster. As time after plant fiber blanket constructed prolonged, the physical and chemical properties of the soils covered with plant fiber blanket were gradually improved. Among the three types of plant fiber blankets, mixed coir-straw blanket was the best in soil amelioration after one year's conduction.

**Keywords:** plant fiber blanket; soil and water conservation; soil amelioration; benefit evaluation

水土流失是全球性的重大生产和环境问题,而裸露土质陡坡上发生的水土流失最为强烈。在道路建设,尤其是高速公路施工中产生的挖方或填方坡面以及弃土等废料堆积场,往往形成大量裸露陡坡,水土流失潜在风险巨大。传统护坡措施如浆砌或干砌块石、现浇混凝土以及加筋土挡墙等,以及之后兴起的骨架护坡方式如菱形网格骨架、拱形骨架和方格骨架等,在道路边坡防护中广泛应用,但对于土壤天然休止角较大、边坡自身稳定性较高的地区,这类工程措施实际作用远低于其自身价值,因此多种新型生态护坡方式迅速发展,包括液压喷播、土工格网植草、三维植被网技术<sup>[1]</sup>和植物纤维毯边坡防护技术<sup>[2]</sup>等。植物纤维毯边坡防护技术具有耗费资源少、施工周期短、经济成本低、有效促进植被恢复等优势,且植物纤维毯是利用农业生产废弃秸秆生产而成,能够促进资源有效利用、减少秸秆焚烧带来的污染、保护生态环境,因此在众多边坡防护措施中脱颖而出。

植物纤维毯是一类经化工网固定天然植物纤维而成的土工织物的总称。常用的植物纤维包括稻草、椰丝、棕榈纤维等,常用的化工网为聚丙烯网。植物纤维毯用于边坡防护的主要作用可以归纳为保持水土、促进植被恢复和改良土壤 3 个方面。关于植物纤维毯降低土壤侵蚀, Alvarez-Mozos 等<sup>[3]</sup>通过室外小区自然降雨侵蚀监测发现,椰丝毯在 45°和 60°小区分别降低侵蚀 89.64%和 55.58%,说明椰丝毯能够很好地减蚀,且在较小坡度下减蚀效益更佳。Shao 等<sup>[4]</sup>开展人工模拟降雨试验,测定黄麻毯与合成毯在 10, 30, 50 mm/h 3 个雨强下边坡防护效益,结果表明黄麻毯可平均减蚀 99.4%。Won 等<sup>[5]</sup>通过模拟 30, 60 mm/h 降雨发现,在较小雨强下,植物纤维毯覆盖小区几乎不产生侵蚀,雨强增大后植物纤维毯减蚀效益降低。在植物纤维毯对产流的作用方面,学者们得到不同的结果。Alvarez-Mozos 等<sup>[3]</sup>发现椰丝毯小区径流量分别增大 150.16%和 227.98%。Shao 等<sup>[4]</sup>提出黄麻毯平均减流 62.1%,且减流效益随雨强增大而减小,这一规律与 Won 等<sup>[5]</sup>研究结果一致。分析关于植物纤维毯对产流的不同作用,最主要原因可能是降雨条件差异,因为雨滴打击在植物纤维上可

沿着纤维形成直接径流,对于不同降雨条件,直接径流对于整体产流的贡献比不同。在植被恢复中,植物纤维毯可起到保护种子免于被径流冲走<sup>[6]</sup>、提高土壤含水率和降低土壤温度日间波动<sup>[7]</sup>及改善土壤微环境<sup>[8]</sup>等作用。植物纤维毯对土壤理化性质影响的相关研究较少,但多数学者认为植物纤维毯具有改善土壤结构<sup>[9]</sup>、提高土壤有机质及营养元素含量<sup>[10]</sup>等作用。

回顾现有研究发现,植物纤维毯水土保持效益的试验中,应用的雨强跨度一般较小,难以评价植物纤维毯在大雨强范围内水土保持效益的差异,而植物纤维毯作为一种应用型产品,其水土保持效益和对土壤理化性质的作用必然受地域差异影响,因此本研究中将测试 3 种植物纤维毯在大雨强范围内对华北地区典型褐土的水土保持效益,同时结合野外小区试验,评价植物纤维毯对土壤理化性质的影响。研究结果将有助于完善植物纤维毯水土保持效益知识体系,为其在道路边坡等土质裸露边坡防治和生态恢复中的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 水土保持效益评价试验

1.1.1 试验材料 通过人工模拟降雨试验定量评价植物纤维毯的水土保持效益,选取市面上常见的 3 种植物纤维毯(椰丝毯、椰丝稻草混合毯、稻草毯),其中椰丝毯所用植物纤维为 100%椰丝,质量 350 g/m<sup>2</sup>,厚度 6 mm;椰丝稻草混合毯所用植物纤维为 50%椰丝和 50%稻草,质量 230 g/m<sup>2</sup>,厚度 3.5 mm;稻草毯所用植物纤维为 100%稻草,质量 260 g/m<sup>2</sup>,厚度 3.5 mm。供试土壤为华北地区道路边坡回填常用的褐土,取土位置为河北省高邑县近郊,根据 USDA 土壤颗粒分级标准,砂粒(2~0.05 mm)含量 33.61%,粉粒(0.05~0.002 mm)含量 55.22%,黏粒(<0.002 mm)含量 11.17%,质地分类属于粉质壤土。土壤有机质含量为 3.7 g/kg。供试土壤取回后风干并过 1 cm 孔径筛,通过烘干法测得风干含水量为 6%。

1.1.2 试验方法 人工模拟降雨试验于 2014 年 5—8 月在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室房山实验基地进行,模拟降雨通过 3 台槽式下喷式模拟降雨机实现,水压 0.04 MPa,喷头型号为

Spraying System Co. Veejet 80150, 有效降雨面积 13.2 m<sup>2</sup>, 降雨均匀度 95% 以上, 喷头距试验小区高度不低于 2.5 m。试验共采用 4 个雨强, 分别为 24, 47, 71, 93 mm/h, 每次降雨历时 60 min。为模拟道路边坡回填土方与下层路基的不同容重, 试验小区(长 200 cm、宽 100 cm、高 40 cm)采用分层装填的方法, 总厚度 35 cm 共分为 2 层, 下层厚度 15 cm, 容重 1.7 g/cm<sup>3</sup>, 上层厚度 20 cm, 容重 1.3 g/cm<sup>3</sup>, 小区上部 5 cm 边壁起到汇集径流和阻挡土壤颗粒向外进溅的作用, 小区下端有集流槽和出水口以便收集径流泥沙。在准备好的试验小区上用“U”形钉固定植物纤维毯, 将不铺设植物纤维毯的裸露小区作为对照。为模拟道路边坡陡峭的坡度, 将试验小区的坡度调整为 1:1.5。将试验小区置于模拟降雨机下进行降雨, 尽管模拟降雨系统均匀度很高, 但试验过程中每次降雨只测试 1 个小区, 使每次降雨试验小区均置于同一位置, 从而保证每个试验小区接受的降雨最大程度保持一致。降雨过程中以 5 min 为采样间隔收集径流泥沙, 降雨结束后, 测定每 5 min 径流量, 待收集的径流静止澄清后, 倒出上清液, 将泥沙置于烘箱中于 105 ℃ 烘干 48 h 后称重获得每 5 min 侵蚀量。试验共进行 16 场模拟降雨, 获得 192 份径流泥沙样品。

1.1.3 计算方法 侵蚀模数是表征土壤侵蚀的重要参数, 定义为单位时间单位投影面积的侵蚀量, 一般为年均土壤侵蚀模数, 但在本研究中为对比植物纤维毯护坡作用, 各试验处理的降雨条件完全相同, 因此去掉了时间条件, 则本研究中土壤侵蚀模数为单位投影面积的侵蚀量, 计算公式为:

$$A=W/S=W/(1 \times 2 \times \cos(\arctan(1/1.5))) \approx W/1.66 \quad (1)$$

式中:  $A$  为侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>);  $W$  为总侵蚀量(g);  $S$  为试验小区投影面积(m<sup>2</sup>)。

为直观比较各植物纤维毯降低侵蚀的能力, 引入减蚀效益指标, 并定义为植物纤维毯覆盖减少的侵蚀量与裸露对照试验小区侵蚀量的比值, 计算公式为:

$$R_e=100 \times (A_0 - A)/A_0 \quad (2)$$

式中:  $R_e$  为减蚀效益(%);  $A_0$  为裸露对照小区侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>);  $A$  为植物纤维毯覆盖小区侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>)。

径流深是表征产流的重要依据, 定义为单位产流面积的径流量, 计算公式为:

$$D=Q/S=Q/(1 \times 2 \times \cos(\arctan(1/1.5))) \approx Q/1.66 \quad (3)$$

式中:  $D$  为径流深(mm);  $Q$  为径流总量(L)。

为直观比较各植物纤维毯降低产流的能力, 引入减流效益指标, 并定义为植物纤维毯覆盖减少的径流深与裸露对照试验小区径流深的比值, 计算公式为:

$$R_r=100 \times (D_0 - D)/D_0 \quad (4)$$

式中:  $R_r$  为减流效益(%);  $D_0$  为裸露对照小区径流深(mm);  $D$  为植物纤维毯覆盖小区径流深(mm)。

## 1.2 土壤改良效益评价试验

1.2.1 试验材料 通过在野外小区采集土样结合实验室测定的方法, 对比不同铺设年限和不同植物纤维毯类型条件下, 土壤基本物理性质和化学性质的变化, 从而评价植物纤维毯土壤改良效益。野外小区集中于河北省高邑县附近道路边坡, 分别为 2007 年铺设稻草毯、2010 年铺设稻草毯、2013 年铺设稻草毯和 2014 年春季铺设稻草毯的小区, 且在 2014 年同时分别布置了铺设椰丝毯和椰丝稻草混合毯的小区, 共计 6 个试验小区。

1.2.2 试验方法 研究人员于 2015 年 5 月对布设的野外小区进行土样采集, 包括用于测定土壤容重和孔隙度的环刀原状土样, 用于测定土壤含水量的铝盒土样, 以及用于土壤有机质、氮钾含量等化学性质测定的扰动土样, 扰动土样采集深度为 0—10 cm。上述样品均采集 3 个重复。将上述采集的土样带回实验室, 分别通过烘干法测定土壤含水量和容重, 通过容重和比重计算得到土壤总孔隙度, 通过 TOC 法获取土壤有机碳含量并经过系数转换获得有机质含量, 通过 pH 计法测定土壤 pH, 通过碱解扩散法测定土壤有效氮含量, 通过分光光度法测定土壤有效钾含量<sup>[11]</sup>。

## 1.3 数据统计与分析

使用 Excel 2016 软件对试验数据进行整理, 使用 Origin 2016 软件进行数据制图, 使用 SPSS 20 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 减蚀效益

由表 1 可知, 椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻草毯的平均侵蚀模数分别为 105.67, 345.51, 439.21 t/km<sup>2</sup>, 均显著低于裸露对照小区的 1 822.37 t/km<sup>2</sup>, 说明整体上 3 种植物纤维毯均能够有效地保护土壤。对比不同覆盖类型小区在同一雨强下的土壤侵蚀模数发现, 除在 24 mm/h 雨强下椰丝毯和椰丝稻草混合毯的侵蚀模数高于裸露小区, 其他各试验处理土壤侵蚀模数均远低于相应雨强下裸露小区。

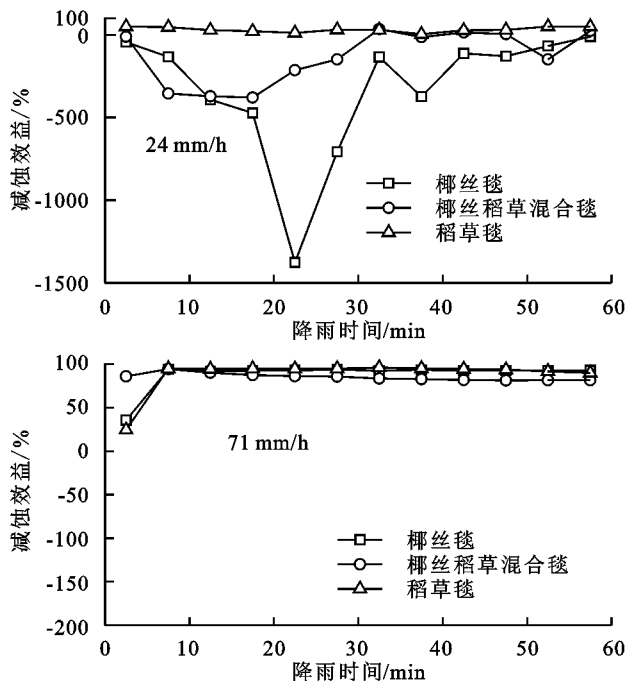
由图 1 可知, 减蚀效益与植物纤维毯类型和试验雨强均有关。对比 3 种类型植物纤维毯, 稻草毯在各雨强下减蚀效益均为正值, 说明稻草毯在各雨强下均能够降低土壤侵蚀, 而椰丝毯和椰丝稻草混合毯在 24 mm/h 雨强下土壤侵蚀分别增大了 266% 和 162%。进一步结合表 1 中土壤侵蚀模数, 尽管椰丝毯和椰丝稻草混合毯在较小雨强下增大了土壤侵蚀, 但其对应侵蚀模数较小, 该现象不影响其用于边坡防护的推广价值。在 24

mm/h 雨强下椰丝毯和椰丝稻草混合毯增大侵蚀,但稻草毯仍可减少侵蚀,这是因为雨滴打击在纤维上形成直接径流,相对于稻草,椰丝致密而纤细,沿椰丝形成的直接径流比沿稻草形成的径流侵蚀力更高,超出了纤维毯的减蚀能力。

表 1 各试验处理在不同雨强下土壤侵蚀模数

试验编号	覆盖类型	雨强/ (mm · h <sup>-1</sup> )	侵蚀模数/ (t · km <sup>-2</sup> )
Y1	椰丝毯	24	41.19
Y2		47	20.72
Y3		71	182.72
Y4		93	178.05
YD1	椰丝稻草混合毯	24	29.54
YD2		47	26.84
YD3		71	329.10
YD4		93	996.58
D1	稻草毯	24	7.28
D2		47	54.64
D3		71	169.25
D4		93	1525.67
L1	裸露对照	24	11.25
L2		47	840.56
L3		71	2104.88
L4		93	4332.77

对于 3 个较大雨强,3 种植物纤维毯均表现出优秀的减蚀效益,椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻草毯平均减蚀效益分别为 94.92%,86.06%和 83.42%。对于单一雨强,在 47 mm/h 雨强下,椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻



草毯的减蚀效益分别达到 97.54%,96.81%和 93.50%。随着雨强进一步增大,3 种植物纤维毯减蚀效益表现出不同程度的减小,在 71 mm/h 雨强下,椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻草毯的减蚀效益分别 91.32%,84.36%和 91.96%。当雨强增大到 93 mm/h,椰丝毯保持着高达 95.89%的减蚀效益,稻草毯减蚀效益似突破临界点而大幅降低为 64.79%,椰丝稻草混合毯减蚀效益居中为 77.00%。

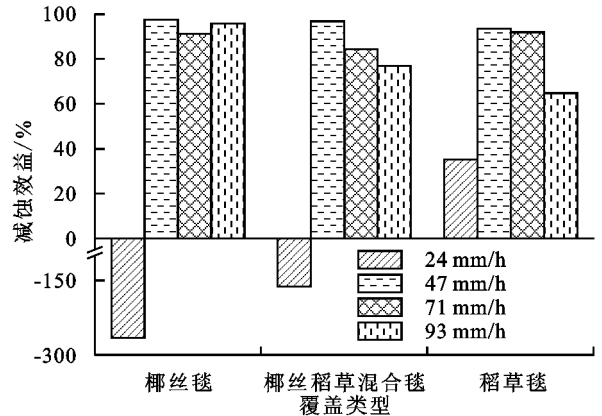


图 1 植物纤维毯不同雨强下减蚀效益对比

亦随降雨累积时间发生变化(图 2)。在持续降雨过程中,减蚀效益一般在 5~15 min 达到最高并保持相对稳定。但在 24 mm/h 雨强下,随着降雨时间累积,稻草毯始终表现为优秀的减蚀效益,而椰丝毯和椰丝稻草混合毯则波动较大,特别是椰丝毯在 20~25 min 时间段出现了超出预期的极大增加土壤侵蚀的现象。

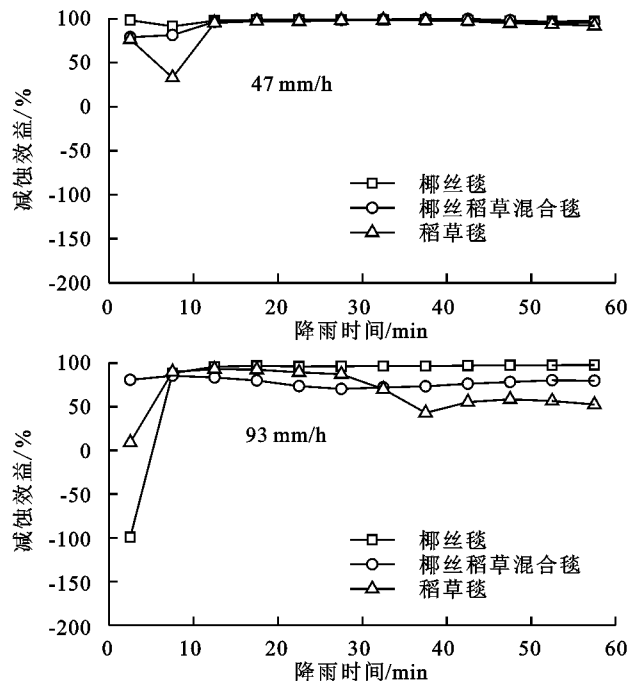


图 2 减蚀效益随降雨时间变化过程

对于 3 个较大雨强,3 种植物纤维毯减蚀效益之间的差异随着雨强增大而增大,且均在降雨初期减蚀

效益波动较大,随后达到相近的最大减蚀效益,但在此后的降雨过程中,各植物纤维毯减蚀效益的差异随

雨强的增大和降雨时间的累积而增大,椰丝毯减蚀效益保持最高的稳定性,稻草毯波动最大,椰丝稻草混合毯居中。值得注意的是,在 93 mm/h 雨强下,降雨累积时间 5~30 min 时间段,稻草毯减蚀效益持续保持高位,但在 30 min 开始急剧降低,后在 40 min 开始保持相对稳定,这可能是由于随着降雨入渗土壤含水量增大,表土流动性增大,侵蚀力超出纤维—土壤综合体抗蚀能力临界值所致,这也是该雨强下稻草毯平均减蚀效益相对较低的主要因素。相比于稻草毯,椰丝毯纤维更加纤细且致密,椰丝纤维与表土结合形成的纤维—土壤综合体结构更加稳定,故抗蚀能力更强,尽管随着土壤含水量的增大,其抗蚀能力存在一定程度地降低,但试验降雨条件下侵蚀力不足以突破其抗蚀能力,从而使椰丝毯在降雨过程中始终保持高位减蚀效益。

## 2.2 减流效益

由表 2 可知,椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻草毯的平均径流深分别为 17.42、16.01、13.73 mm,均显著低于裸露对照小区径流深 23.82 mm,表明总体上 3 种植物纤维毯均能够有效地降低产流增加入渗。但在 24 mm/h 雨强下,3 种植物纤维毯覆盖小区径流深均高于对应裸露对照小区径流深,这是由于雨滴打击在纤维上形成的直接径流导致的径流增量超过了植物纤维毯的减流作用,椰丝毯径流深最大(1.34 mm),椰丝稻草混合毯径流深(0.88 mm)最接近裸露对照小区(0.80 mm)。对于每一种覆盖类型,径流深和产流系数表现出一致地随雨强增大而增大的趋势,除稻草毯外,其他 3 种覆盖类型在 71、93 mm/h 雨强下产流系数增大不明显。

表 2 各试验处理在不同雨强下径流深和产流系数

试验编号	覆盖类型	雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	径流深/ mm	产流 系数/%
Y1	椰丝毯	24	1.34	5.60
Y2		47	7.94	16.89
Y3		71	25.15	35.43
Y4		93	35.25	37.90
YD1	椰丝稻草混合毯	24	0.88	3.66
YD2		47	1.70	3.62
YD3		71	25.71	36.21
YD4		93	35.77	38.46
D1	稻草毯	24	1.32	5.49
D2		47	2.82	6.01
D3		71	16.56	23.32
D4		93	34.24	36.82
L1	裸露对照	24	0.80	3.35
L2		47	14.49	30.83
L3		71	34.36	48.40
L4		93	45.64	49.07

由植物纤维毯在不同雨强下减流效益(图 3)可知,减流效益与雨强和植物纤维毯类型密切相关。在

较小雨强(24 mm/h),3 种植物纤维毯的减流效益均为负值,意味着此时产流均增大,其中椰丝稻草混合毯的对产流的增大幅度最小,这是由于椰丝稻草混合毯的纤维材料(230 g/m<sup>2</sup>)小于椰丝毯(350 g/m<sup>2</sup>)和稻草毯(260 g/m<sup>2</sup>),从而雨滴打击在纤维上形成的直接径流相对较少。当雨强达到 47 mm/h 及以上时,3 种植物纤维毯均能有效减少产流,稻草毯平均减流效益表现最佳(52.44%),椰丝稻草混合毯次之(45.02%),椰丝毯最弱(31.59%),其原因是椰丝毯厚重致密,覆盖度相对较高,较多降雨在其纤维层形成直接径流。3 种植物纤维毯均在 47 mm/h 雨强下减流效益最高,椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻草毯减流效益分别为 45.22%、88.26% 和 80.52%。随着雨强增大到 71 mm/h,3 种植物纤维毯减流效益均明显降低,稻草毯减蚀效益最高(51.82%),椰丝毯和椰丝稻草混合毯均略高于 25%。在最大 93 mm/h 雨强下,3 种植物纤维毯减流效益相近,均略高于 20%。这是由雨滴打击在纤维上形成的直接径流导致的径流增量超过了 3 种植物纤维毯的减流作用造成的,椰丝毯增大径流最为剧烈(67.24%),但这一情况对应的产流系数也仅为 5.60%(表 2)。

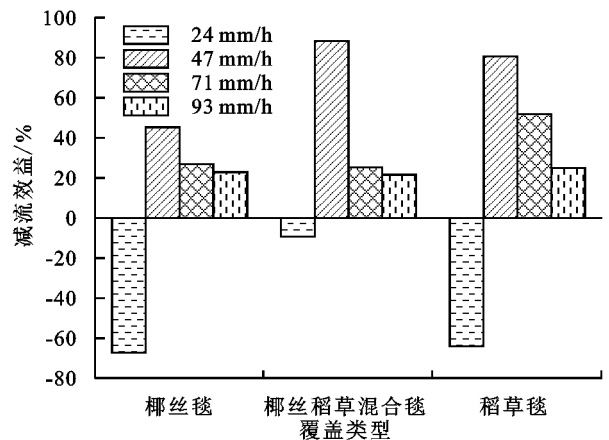


图 3 植物纤维毯不同雨强下减流效益对比

植物纤维毯的减流效益随着降雨时间累积表现出明显差异(图 4),与减蚀效益随时间变化趋势类似,在 24、93 mm/h 雨强下,各植物纤维毯减流效益波动较大。对于 3 个较大雨强,与减蚀效益表现相反,3 种植物纤维毯减流效益之间的差异随着雨强增大而逐渐减小,这是因为随着雨强增大,裸露小区的产流系数增大,即径流比例增高,导致植物纤维毯增加的入渗相对于裸露小区的产流增加比例减小,从而各植物纤维毯减流效益之间差异减小。多数试验处理减流效益在降雨初期表现为随着降雨时间累积逐渐增大,并在 10~20 min 时间段达到最大,在此后的降雨过程中,减流效益在 47 mm/h 雨强下保持相对稳定,在 71、93 mm/h 雨强下逐渐降低,且 93 mm/h 雨强下降低速度更快。

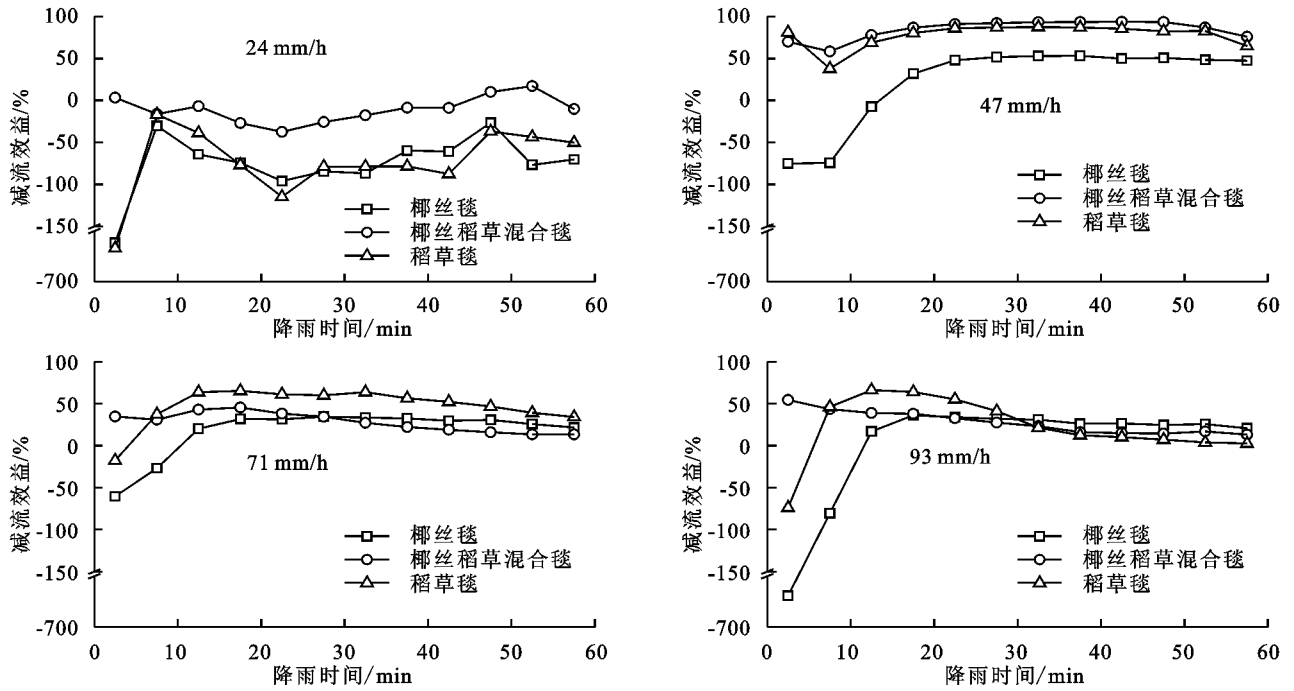


图 4 减流效益随降雨时间变化过程

### 2.3 土壤改良效益

表 3 为用于评价植物纤维毯土壤改良效益的野外小区土壤理化性质测定结果,因道路边坡不允许有裸露无保护的情况,因此野外小区无法设置裸露处理进行对照,而是通过对比同种植物纤维毯不同铺设年限和同一铺设年限不同植物纤维毯类型小区土壤理化性质进行相对差异评价。小区 1~4 展示了土壤理化性质随稻草毯铺设年限的变化。铺设 1 年小区土壤含水量(12.2%)明显高于其他 3 个铺设年限小区,这是因为施工第 1 年有灌溉养护。铺设 2,5,8 年的小区土壤含水量均为 6%~7%,没有明显区别,这可能是稻草毯铺设年限对表土含水量没有明显影响。随着铺设年限增加,除铺设 1 年小区回填扰动土壤还没有达到稳定外,土壤容重基本呈现逐渐减小的趋势,

铺设 2,5,8 年小区土壤容重分别为 1.49,1.40,1.33  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,相应地土壤总空隙度逐渐增加,形成土壤逐渐疏松的趋势。较长铺设年限 3 个小区 pH 分别为 8.15,8.24,8.27,呈增加趋势,这可能是因为随着稻草毯铺设年限的增加,改善了表层土壤环境,土壤微生物活动增强,使得土壤氧化还原电位降低,pH 升高<sup>[12]</sup>。对于土壤养分情况,测定了有效氮和有效钾,两者含量基本随铺设年限延长而增大,铺设 8 年小区有效氮含量和有效钾含量分别约为铺设 1 年小区的 2.7,1.7 倍。土壤有机质含量与铺设年限未表现出一致规律,究其原因可能是有机质含量受植物纤维毯降解、植被恢复过程中产生的植物残体降解和土壤微生物活动等多方面过程影响,而几个过程之间作用关系复杂所致。

表 3 不同铺设年限不同植物纤维毯类型野外小区土壤理化性质

小区 编号	覆盖 类型	铺设 年份	铺设 年限/a	土壤 含水量/% ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	总孔 隙度/%	pH	有效氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有效钾/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
1	稻草毯	2007	8	7.0	1.33	49.81	8.27	56	148	3.9
2	稻草毯	2010	5	6.5	1.40	47.36	8.24	35	170	4.5
3	稻草毯	2013	2	6.6	1.49	43.78	8.15	36	93	3.0
4	稻草毯	2014	1	12.2	1.43	46.04	8.35	20	86	4.3
5	椰丝稻草混合毯	2014	1	14.1	1.39	47.93	8.45	56	93	4.1
6	椰丝毯	2014	1	12.3	1.43	46.23	8.59	19	87	3.8

小区 4~6 展示了植物纤维毯类型对土壤理化性质造成的差异。椰丝稻草混合毯覆盖小区土壤含水量(14.1%)明显高于椰丝毯小区(12.3%)和稻草毯小区(12.2%),这是因为 3 个小区施工年限均为 1 年,仍在通过水车喷灌养护中,而在该喷灌条件下椰丝稻草混合毯减流效益更高。较好的水分条件往往

促进植被恢复和微生物活动,从而改善土壤结构,测试结果证实椰丝稻草混合毯小区土壤容重小于椰丝毯小区和稻草毯小区,总孔隙度高于椰丝毯小区和稻草毯小区。土壤有效氮含量和有效钾含量同样表现为椰丝稻草混合毯小区高于椰丝毯小区和稻草毯小区,其中有效氮含量是其他 2 种处理含量近 3 倍。

3种植物纤维毯小区土壤有机质含量表现为稻草毯>椰丝稻草混合毯>椰丝毯,这是由稻草和椰丝纤维降解速度造成差异造成的,稻草毯1年内降解率为83.1%,而椰丝毯仅为36.8%<sup>[8]</sup>。

### 3 讨论

植物纤维毯对土壤侵蚀和产流作用是一个复杂过程的综合体现。植物纤维毯促进保水保土的主要机制包括多个方面。当植物纤维毯铺设于土表,由于植物纤维的悬垂性,下层纤维与土壤结合,形成纤维-土壤综合体,抗蚀能力提高;随着纤维吸水,植物纤维毯悬垂性增强<sup>[13]</sup>,因此植物纤维毯减蚀效益往往在降雨初期随降雨累积时间增大。纤维-土壤综合体形成大量微型洼地<sup>[14]</sup>,可拦蓄更多径流和泥沙;地表粗糙度增大<sup>[15]</sup>,可降低水流流速,增大水流平均深度,促进入渗<sup>[16]</sup>;径流侵蚀力降低,分离土壤能力减弱<sup>[6]</sup>;径流挟沙力降低,促进侵蚀泥沙沉积。植物纤维毯覆盖能够减少或避免雨滴直接打击表土,减少土壤溅蚀和雨滴对表土的破碎作用,同时减弱土表的结皮形成<sup>[17]</sup>。植物纤维可吸收水分,毯状结构增强截流,从而直接减少径流总量。然而,植物纤维毯亦存在着增大径流和侵蚀的可能,其机制在于:当雨滴打击到植物纤维毯上,部分雨滴会沿纤维表面或在纤维层中形成直接径流,当其他条件相同,径流量的增大往往伴随着较剧烈的土壤侵蚀。上述多种作用机制的综合,决定植物纤维毯对侵蚀和产流最终结果。

在本研究中,3种植物纤维毯在3个较大雨强下均有着优秀的减蚀效益和较好的减流效益,椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻草毯的平均减蚀效益分别为94.92%,86.06%和83.42%,这与Bhattacharyya等<sup>[18]</sup>在东南亚地区试验发现植物纤维毯可降低土壤侵蚀67%~98%,以及Kalibova等<sup>[19]</sup>提出的植物纤维毯降低土壤侵蚀90%以上得到相互印证。在所测试的4个雨强中,植物纤维毯在47 mm/h雨强下减蚀效益最高,随着雨强继续增大减蚀效益降低,而Shao等<sup>[4]</sup>测试10,30,50 mm/h 3个雨强亦发现对应50 mm/h雨强时减蚀效益最高,这进一步证实了本文中关于减蚀效益随雨强先增大后减小,在中等雨强减蚀效益最高的推论。3个较大雨强下椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻草毯的平均减流效益分别为31.59%,45.02%和52.44%,植物纤维毯减少产流的作用亦得到相关研究的证实<sup>[5]</sup>。在24 mm/h雨强下,与裸露对照小区相比,得到了与Alvarez-mozos等<sup>[3]</sup>研究类似的结果,3种植物纤维毯均不同程度增大了产流,这是由于雨滴打击在纤维上形成的直接径流导致的径流增量超过其的减流作用;关于土壤侵蚀,椰丝毯和椰丝稻草混合毯增大了侵蚀,稻草毯可

减少侵蚀,这可能是相对于稻草毯,椰丝毯更加致密,椰丝纤维更加纤细,沿椰丝形成的直接径流比沿稻草形成的径流侵蚀力更高。

在实际应用中,植物纤维毯不仅能保水保土,一定程度上改善土壤理化性质、促进植被恢复也是其主要功能之一,配合植被恢复后水土保持效果更为持久<sup>[20]</sup>,植物纤维毯在其降解之前将于植被共同起到保持水土的作用,其耐久性也是其应用的重要指标之一,在未来的研究中,可结合植物纤维毯与植被恢复,评价植物纤维毯对植被恢复的促进作用,量化植物纤维毯和植被所构成整体的水土保持效益,并评价植物纤维毯在自然条件下的耐久性。

### 4 结论

(1)在47 mm/h及以上雨强下,椰丝毯、椰丝稻草混合毯和稻草毯均能有效降低侵蚀和减少产流,平均减蚀效益分别为94.92%,86.06%和83.42%,平均减流效益分别为31.59%,45.02%和52.44%。3种植物纤维毯减蚀效益和减流效益均在47 mm/h雨强最高,随雨强进一步增大表现出不同程度的降低。在24 mm/h雨强下存在着侵蚀和产流增大的现象。

(2)植物纤维毯可改良土壤,土壤有效氮含量和有效钾含量一般随着稻草毯铺设年限延长而增大,铺设8年小区有效氮含量和有效钾含量分别约为铺设1年小区的2.7,1.7倍。在铺设1年之后3种植物纤维毯相比,椰丝稻草混合毯改良土壤效果最佳,土壤含水量、总孔隙度、有效氮含量和有效钾含量均明显高于椰丝毯小区和稻草毯小区。

(3)植物纤维毯能够降低土壤侵蚀,增加入渗减少产流,改善土壤理化性质,但减蚀效益最好,减流效益次之,植物纤维毯可在一定程度上改善土壤理化性质,但其程度不及减蚀效益和减流效益。

#### 参考文献:

- [1] 王洋. 公路路基高边坡防护措施[J]. 交通世界, 2018(20):49-50,53.
- [2] Smith S W, Ross K, Karlsson S, et al. Going native, going local: Revegetating eroded soils on the Falkland Islands using native seeds and farmland waste [J]. Restoration Ecology, 2018, 26(1): 134-144.
- [3] Alvarez-mozos J, Abad E, Gimenez R, et al. Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 1: Effects on runoff and soil loss [J]. Catena, 2014, 118: 168-178.
- [4] Shao Q, Gu W, Dai Q Y, et al. Effectiveness of geotextile mulches for slope restoration in semi-arid northern China [J]. Catena, 2014, 116: 1-9.
- [5] Won C H, Choi Y H, Shin M H, et al. Effects of rice straw mats on runoff and sediment discharge in a laboratory

- rainfall simulation[J]. *Geoderma*, 2012, 189: 164-169.
- [6] Smets T, Poesen J, Langhans C, et al. Concentrated flow erosion rates reduced through biological geotextiles [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(4): 493-502.
- [7] 张建生, 张梅花, 李庆会, 等. 生态垫覆盖对沙漠土壤水分和温度的影响[J]. *中国沙漠*, 2008(2): 280-283.
- [8] 李宏钧, 孔亚平, 张岩, 等. 植物纤维毯对道路边坡微生物环境的影响[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(6): 146-151.
- [9] 张科利, 细山田健三. 人工防蚀生草膜保持及改良土壤作用的研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(4): 21-25.
- [10] 张利, 罗麟, 朱欣伟, 等. 生态毯对川西北流动沙地生态恢复的影响[J]. *草地学报*, 2017, 25(5): 1156-1159.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 刘志光. 土壤氧化还原电位的研究及其应用[J]. *土壤学进展*, 1983(4): 1-10.
- [13] Rickson R J. Controlling sediment at source: An evaluation of erosion control geotextiles [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(5): 550-560.
- [14] Mitchell D J, Barton A P, Fullen M A, et al. Field studies of the effects of jute geotextiles on runoff and erosion in Shropshire, UK [J]. *Soil Use and Management*, 2003, 19(2): 182-184.
- [15] Bhattacharyya R, Fullen M A, Booth C A. Using palm-mat geotextiles on an arable soil for water erosion control in the UK [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(7): 933-945.
- [16] Bhattacharyya R, Fullen M A, Booth C A, et al. Effectiveness of biological geotextiles for soil and water conservation in different agro-environments [J]. *Land Degradation & Development*, 2011, 22(5): 495-504.
- [17] Sutherland R A, Ziegler A D. Effectiveness of coir-based rolled erosion control systems in reducing sediment transport from hillslopes [J]. *Applied Geography*, 2007, 27(3/4): 150-164.
- [18] Bhattacharyya R, Yi Z, Yongmei L, et al. Effects of biological geotextiles on aboveground biomass production in selected agro-ecosystems [J]. *Field Crops Research*, 2012, 126: 23-36.
- [19] Kalibova J, Jacka L, Petru J. The effectiveness of jute and coir blankets for erosion control in different field and laboratory conditions [J]. *Solid Earth*, 2016, 7(2): 469-479.
- [20] 任改, 白芝兵, 赵迪, 等. 不同生态护坡下水土保持效果动态变化研究[J]. *人民长江*, 2017, 48(17): 25-27, 45.
- (上接第 344 页)
- [14] 李素霞, 韦司棋, 刘云霞. 3 种改良剂对氮镉互作下小白菜产量和品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(4): 1709-1712.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-79.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 295-323.
- [17] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 122-123.
- [18] Pueyo M, Mateu J, Rigol A, et al. Use of the modified BCR three-step sequential extraction procedure for the study of trace element dynamics in contaminated soils [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(2): 330-341.
- [19] 朱启红. 酒糟生物炭输入对重度重金属复合污染土壤性质及水稻生长的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2016.
- [20] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 2762-2017 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] 李力, 刘娅, 陆宇超, 等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. *环境化学*, 2011, 30(8): 1411-1421.
- [22] 李衍亮, 黄玉芬, 魏岚, 等. 施用生物炭对重金属污染农田土壤改良及玉米生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(11): 2233-2239.
- [23] 徐楠楠, 林大松, 徐应明, 等. 生物炭在土壤改良和重金属污染治理中的应用[J]. *农业资源与环境学报*, 2013, 30(4): 29-34.
- [24] 李丹, 李俊华, 何婷, 等. 不同改良剂对石灰性镉污染土壤的镉形态和小白菜镉吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(9): 1679-1685.
- [25] 许妍哲, 方战强. 生物炭修复土壤重金属的研究进展[J]. *环境工程*, 2015, 33(2): 156-159.
- [26] Mierzwa-hersztek M, Gondek K, Baran A. Effect of poultry litter biochar on soil enzymatic activity, ecotoxicity and plant growth [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 105: 144-150.
- [27] 王学锋, 尚菲, 刘修和, 等. Cd、Ni 单一及复合污染对土壤酶活性的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(9): 4027-4034.
- [28] 刘阿梅, 向言词, 田代科, 等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5): 193-198.
- [29] 陈心想, 何绪生, 耿增超, 等. 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6534-6542.
- [30] 魏彬萌, 王益权, 李忠徽. 烟杆生物炭对砒砂岩与沙复配土壤理化性状及玉米生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 217-222.