

## 黑麦草对黄土坡面降雨产流产沙过程的影响

董月群<sup>1</sup> 李淑芹<sup>1</sup> 原翠萍<sup>2</sup> 雷廷武<sup>1,3\*</sup>

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083; 2. 北京国泰天平行土地规划设计有限公司,北京 100873;  
3. 中国科学院 水利部水土保持研究所,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** 为研究草地对土壤侵蚀过程的影响,选用黄绵土人工种植草地,采用室内模拟降雨试验研究黑麦草不同覆盖度(0、25%、50%和75%)对3种降雨强度(60、90和120 mm/h)坡面产流产沙过程的影响。结果表明:黑麦草覆盖可以显著减小侵蚀产沙。在坡面土壤预饱和的条件下,坡面产流、产沙与时间呈线性关系;累计产流量随降雨强度线性增加;同一降雨强度条件下,草地覆盖度对累计产流量影响不显著;草地坡面水流含沙量、输沙率、次降雨产沙量均随覆盖度增大而降低,随降雨强度增大而增加;3种降雨强度条件下,无黑麦草覆盖坡面水流含沙量差异不显著,次降雨产沙量和输沙率随着降雨强度的增加而增大。研究结果可为土壤侵蚀预报模型建立及水土保持措施的制定提供理论参考。

**关键词** 土壤侵蚀; 降雨; 产流; 产沙; 黑麦草; 覆盖度; 黄土坡面

**中图分类号** S 152.7 **文章编号** 1007-4333(2011)04-0067-07 **文献标志码** A

## Impacts of rye grasses on runoff and sedimentation processes from loess slopes

DONG Yue-qun<sup>1</sup>, LI Shu-qin<sup>1</sup>, YUAN Cui-ping<sup>2</sup>, LEI Ting-wu<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Grandtoppeak Tianpinghang Land Plan and Design Co., Ltd., Beijing 100873, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract** The vegetative coverage on the slope, as an effective measure for soil and water conservation can regulate runoff and sedimentation. A series of flume experiments on the slopes set at 15°, under 4 rye grass coverages (0, 25%, 50%, 75%), were conducted under 3 rainfall intensities (60, 90, 120 mm/h) with silty-loamy (loess) soil, to study the impacts of the rye grass coverages on the runoff and sedimentation processes. The results showed that the rye grass significantly reduced sediment yields. Under saturation conditions, the runoff and sediment yield processes were linear functions of time. No significant differences of runoff yielded were found amongst different coverages of rye grass, but they increased with rainfall intensity. The sediment concentration, sediment yield and sediment delivery rate from the grassed slopes decreased with the grass coverage, and increased with the rainfall intensity. At the slopes without grass cover, there existed no significant differences of the sediment concentrations under different rainfall intensities, while sediment yield and sediment delivery rate increased with rainfall intensity. Understanding the impacts of the rye grass coverage on the runoff and sedimentation processes from loess slopes is important to the managements of water conservation.

**Key words** soil erosion; rainfall; runoff; sedimentation; rye grass; coverage; loess slopes

收稿日期: 2010-12-29

基金项目: 黄土高原水土流失数学模型(第1期)研发(黄水保[2007]19号); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-245)

第一作者: 董月群, 博士研究生, E-mail: dongyuequn@163.com

通讯作者: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治、农业水土工程、灌溉理论与技术专业研究, E-mail: ddragon@public3.bta.net.cn

植被覆盖通过降低降雨动能、截留降雨、增加入渗等减轻坡面侵蚀,是一项重要的水土保持措施。研究降雨条件下植被覆盖比例对坡面土壤侵蚀的影响及其作用机制,对水土保持措施的配置具有理论指导意义。

坡面植被覆盖可以使坡面产流减小 25%~70%<sup>[1-2]</sup>,产沙降低 40%~90%<sup>[2-3]</sup>。坡面植被覆盖还可以影响产流产沙过程。研究表明草地坡面的产流产沙过程不同于裸地坡面<sup>[4]</sup>,不同草被盖度及空间配置坡沟系统侵蚀产沙的阶段性变化不如单一坡面明显,其侵蚀产沙特征以及规律比单一坡面复杂<sup>[5]</sup>。降雨强度为 90 mm/h、坡度为 15°的条件下,室内不同的黑麦草盖度坡面产沙与流量呈线性负相关关系,裸地小流量(<1 mm/min)时,产沙率与流量呈线性负相关关系,大流量(>1 mm/min)时,产沙率与流量呈线性正相关关系<sup>[2]</sup>。北美草场风干土以及湿润土的产沙量变化过程相似,先由较高的产沙量急剧降低,而后缓慢降低并逐渐趋于平稳<sup>[6]</sup>。Marques 等在 8 块标准径流小区进行模拟降雨试验(降雨强度 21 mm/h,降雨动能 13.5 J/(m<sup>2</sup>·m)),研究植被覆盖坡面降雨产流过程,结果表明植被覆盖坡面及裸地坡面流量过程先增大而后保持平稳,植被覆盖坡面流量达到稳定状态比裸地坡面快<sup>[7]</sup>。自然降雨条件下裸地坡面产流产沙比草地坡面快且显著大于草地<sup>[8]</sup>。

草地盖度对坡面降雨产流产沙影响的试验研究分为野外试验和室内试验。野外试验受地形以及气候限制,坡度或者降雨强度不可控制<sup>[9]</sup>;室内降雨条件及坡度可以人为控制,但用种植的草地试验只能选取盖度<sup>[2,4]</sup>、降雨强度和生长时间<sup>[10]</sup>中的 1 个或者 2 个。采用室外种植植被,移植至实验室进行试验的方法,既能解决场地有限的问题,又便于更系统地研究植被覆盖对坡面侵蚀的影响。

本研究拟采用室内试验土槽,研究坡面土壤饱和条件下:1)黑麦草不同盖度、降雨强度对坡面产流过程的影响;2)黑麦草不同盖度、降雨强度对坡面产沙过程以及侵蚀量的影响。

## 1 材料及方法

### 1.1 试验材料

试验在中国科学院水利部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人工模拟降雨大厅进行。降雨采用侧喷式降雨器,降雨高度为 16 m。试验土槽长 8 m、宽 3 m,坡度在 0°~30°可调节。根据研究需要,用钢板在试验土槽上分隔出长 8 m、宽 2.4 m、高 0.33 m 的土槽,再用高 0.33 m 的 PVC 板将土槽分隔成 12 个小土槽,每个土槽宽度为 0.2 m、长 8 m。选取 2 个影响因素:降雨强度为 60、90、120 mm/h;盖度为无覆盖(对照)、25%、50%和 75%。试验设 3 个重复。试验用草为分蘖性较强、生长期较短的冷地型多年生黑麦草(*Lolium Perenne* L.)。供试土壤为黄绵土(黏粒含量 5.5%,粉粒含量 60.7%,沙粒含量 33.8%),取自安塞县农地耕层土壤(0~20 cm)。

### 1.2 试验方法

试验前先将土壤过 10 mm 孔筛,去除草根、石块等杂质,在西北农林科技大学试验农场种植草坪。种植前,将试验田用滚轮平整镇压,均匀地覆盖一层厚 5 cm 的黄绵土。根据预期模拟降雨试验的进度,按间隔 7 天分批播种试验用草草坪,每一批包含 3 个盖度(25%、50%和 75%),播种量分别为 1 g/m<sup>2</sup>(25%)、2 g/m<sup>2</sup>(50%)、3 g/m<sup>2</sup>(75%)。待黑麦草出苗以后生长 30 天,按试验需要量带土移植草皮到室内试验土槽。为减少移植过程中对草皮土壤造成的扰动,将草皮切割为长 1 m、宽 0.2 m、厚 10 cm 的条状草皮,并用特制的 1 m×0.2 m 的移植板衬托以便于带土移植。由于黄绵土黏性较差,切土厚度 10 cm(杨凌土厚 5 cm,黄绵土 5 cm)。

覆盖度采用遥感图像处理软件 ERDAS 9.2 分析。用 ERDAS 将所拍摄的草地坡面的 20 cm×20 cm 范围的图像监督分类为 12 种像素,计算代表草的像素所占的百分比即为覆盖度。同时,也采用针刺法减小误差,采用间苗方法控制草地盖度。

装土时,先在土槽中装厚 5 cm 的沙子,上面盖一层纱布。对于有草覆盖的坡面,在纱布上分层装厚 18 cm 的杨凌土(沙壤土,颗粒组成为沙粒 7.1%、粉粒 80.4%、黏粒 12.5%),压实,再将移植过来的草皮平铺在土槽中,为减少边际效应,在土槽两边以及草皮接缝间采用黄绵土修补压实,使草皮之间、草皮与土槽两侧结合紧密。对于对照裸地坡面,先装厚 8 cm 的杨凌土,压实刮平,再分 4 层装入总计厚 20 cm 的供试土壤。对照试验土壤容重控制

在  $1.20 \text{ g/cm}^3$ ，与草地土壤容重一致。试验前，采用  $20 \text{ mm/h}$  降雨强度的降雨对土壤进行充分饱和，在土槽上方  $2 \text{ m}$  处架设补光灯，并放置  $48\sim 72 \text{ h}$ ，使草恢复活性和生长。试验前  $12\sim 24 \text{ h}$  再次降雨充分饱和土壤。

试验时，按设定的降雨强度降雨，产流后持续降雨  $10\sim 30 \text{ min}$ 。试验过程中记录产流时间，并在每个土槽的出口处，每隔  $1\sim 2 \text{ min}$  采样 1 次，记录含沙水的体积  $V$ ，用于计算水流含沙量  $m_s$ 。

### 1.3 数据处理

坡面产流流量  $q$  为单位时间内通过坡面出水口流出清水(含沙水流扣去泥沙)的体积，一定时间段内坡面产流的累计量为总产流水量  $Q$ 。各量具有如下关系：

$$V = V_f + V_s \quad (1)$$

$$m_s = V_s \rho_s \quad (2)$$

式中： $V$  为含沙水的体积， $\text{m}^3$ ； $V_f$  为水的体积， $\text{m}^3$ ； $V_s$  为泥沙的体积， $\text{m}^3$ ； $m_s$  为泥沙的质量， $\text{kg}$ ； $\rho_s$  为泥沙密度，取  $2\ 650 \text{ kg/m}^3$ 。一定时间段内的平均纯水流流量由下式计算得到：

$$q = \frac{V - \frac{m_s}{\rho_s}}{\Delta t} \quad (3)$$

式中： $\Delta t$  为取样时间， $\text{min}$ ； $q$  为纯水流流量， $\text{m}^3/\text{s}$ 。含沙量按惯例定义为单位含沙水中所含泥沙的质量，坡面径流的输沙率为单位时间通过测量断面的泥沙质量。含沙量及输沙率分别采用式(4)和(5)计算：

$$C = \frac{m_s}{V} \quad (4)$$

$$Q_s = \frac{q' C}{1\ 000} \quad (5)$$

式中： $C$  为径流含沙量， $\text{kg/m}^3$ ； $Q_s$  为径流的输沙率， $\text{g/s}$ ； $q'$  为含沙水流量， $\text{m}^3/\text{s}$ 。

## 2 结果及分析

### 2.1 黑麦草对坡面产流过程的影响

影响流量过程的主要因素有植被、坡度、降雨、土壤前期含水率等<sup>[11-12]</sup>，其中植被通过枝叶截流、根系改善土壤理化性质等增加入渗而减小径流<sup>[11-13]</sup>。坡度对坡面侵蚀的影响最终是通过径流量等体现的<sup>[14]</sup>。随着坡度的增大，坡面上单位面积所承接的雨量减小，同时土壤入渗量减小，径流量增大<sup>[15]</sup>。降雨是坡面产流的来源，径流是导致土壤侵蚀的原动力，降雨强度越大，径流及其侵蚀能力越大<sup>[16]</sup>。土壤前期含水率增大，土壤入渗性能减小而径流增加<sup>[17-18]</sup>。

随着降雨强度的增大，不同盖度对应的流量逐渐增大。不同盖度所对应的流量大小相差不大，各盖度坡面流量随时间变化比较平稳(图 1(a)和(b))，这是因为试验前对坡面进行了降雨处理，试验过程中初损较小；实际上，在各种降雨雨强下，试验前  $5 \text{ min}$  坡面流量随时间略有上升，这是由于试验前并没有使坡面土壤充分饱和，导致降雨时有一定的入渗损失。

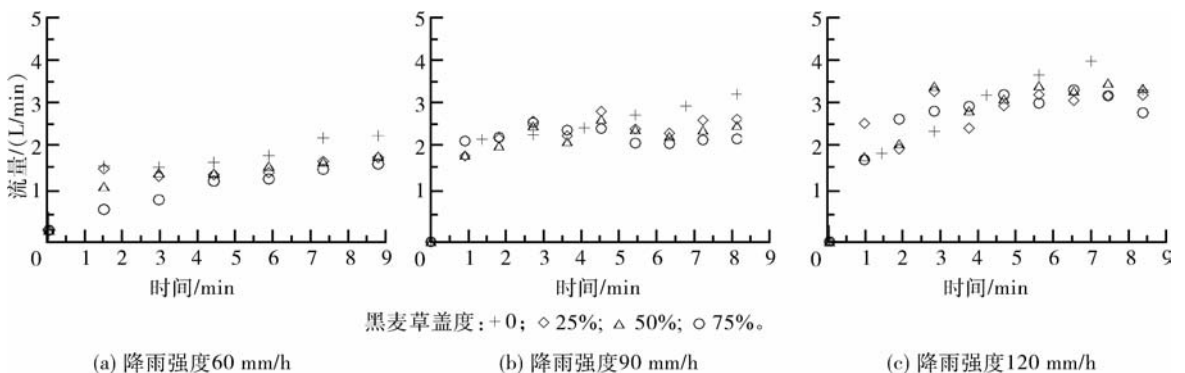


图 1 不同降雨强度下不同盖度坡面产流流量随时间的变化

Fig. 1 Runoff processes of slopes under different rye grass coverages and different rainfall intensities

根据式(3)计算得到坡面流量,再与时间进行积分得到不同降雨强度、不同盖度下的累计产流量(图2)。对黑麦草不同盖度坡面的累计产流量进行  $T$  检验(置信区间百分比为 95%)。结果表明,同一降

雨强度条件下,黑麦草不同盖度坡面累计产流量差异不显著,但总体上坡面累计产流量随黑麦草盖度略呈增长趋势,且增长幅度随降雨强度增大而减小(表1)。

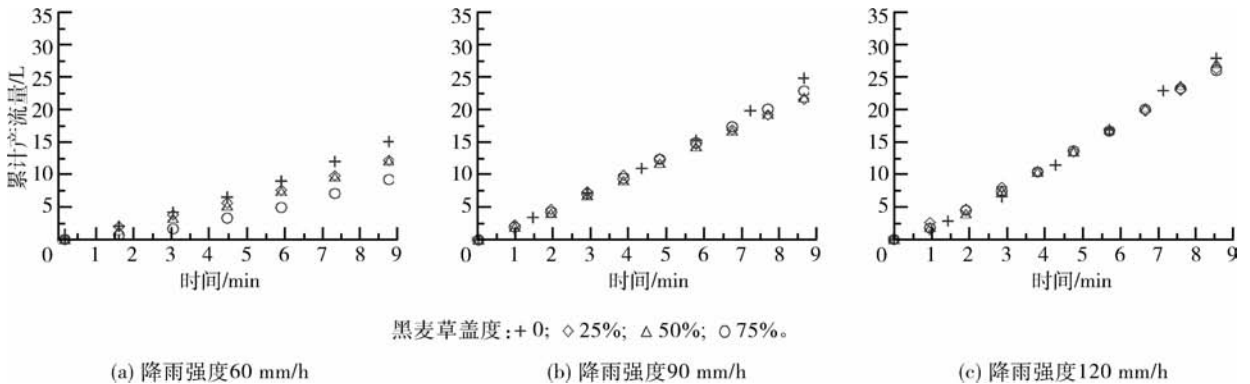


图2 不同降雨强度条件下不同盖度坡面累计产流量随时间的变化

Fig. 2 Runoff yield processes of slopes under different rye grass coverages and different rainfall intensities

表1 不同降雨强度不同盖度下的累计产流量

Table 1 The Runoff yield of slopes under different cases

降雨强度/ (mm/h)	盖度/%	累计 产流量/L	比值 <sup>①</sup>
60	0	16.7	1
	25	13.5	0.81
	50	13.4	0.80
	75	10.2	0.61
90	0	27.6	1
	25	25.4	0.92
	50	24.3	0.88
	75	23.9	0.86
120	0	31.0	1
	25	29.2	0.94
	50	30.2	0.97
	75	29.0	0.94

注:①同一降雨强度各盖度坡面累计产流量与无黑麦草覆盖坡面累计产流量之比。

本试验坡面土壤经过预饱和处理,土壤初始含水率可视为相等。小降雨强度(60 mm/h)时,土壤理化性质对不同盖度的坡面产流占据主要影响,盖度越大,根系密度越大,越能改善土壤理化性质<sup>[19]</sup>而增加入渗,所以累计产流量随盖度减小。随着降雨强度的增大(90和120 mm/h),盖度对草地土壤的保护作用降低,草地产流增加较快,累计产流量趋

于接近裸地累计产流量。该结果与潘成忠的结论相近<sup>[2]</sup>,潘成忠试验论证了15°、90 mm/h条件下,盖度对草地坡面径流量的影响不明显。

流量随降雨时间的变化过程比较稳定,表现为累计产流量  $Q$  随时间  $t$  呈线性关系:

$$Q = at \quad (R^2 = 0.991 \sim 0.999) \quad (6)$$

该结果与张光辉研究结果( $R = \exp(a+bt)$ (裸地)、 $R = ab^t$ (草地))有所不同。这是由于其研究试验前未对坡面进行预饱和处理,土壤前期含水量小于本试验土壤坡面前期含水量,且后者试验坡度为23°,大于本研究的坡度。本研究在试验前对土壤进行饱和处理因而入渗较小。

## 2.2 黑麦草对坡面产沙过程的影响

坡面径流提供了坡面土壤侵蚀和输移的动力。降雨试验中坡面侵蚀产沙过程变化主要表现在径流含沙量、输沙率的变化。盖度、降雨强度、坡度对坡面侵蚀产沙过程都有一定的影响,径流含沙量  $T$  检验结果表明(置信区间百分比为95%),除降雨强度60 mm/h条件下,盖度25%和50%;降雨强度90 mm/h,盖度50%和75%;降雨强度120 mm/h,盖度50%和75%外,不同盖度、不同降雨强度的径流含沙量均值差异显著,且差异大小随降雨强度减小(表2)。

60 mm/h降雨强度裸地坡面径流含沙量为843 kg/m<sup>3</sup>,75%黑麦草覆盖坡面只有76.5 kg/m<sup>3</sup>;90

表2 不同降雨强度不同盖度下的平均含沙量

Table 2 Average sediment concentration of slopes under different cases

降雨强度/ (mm/h)	盖度/ %	含沙量均值/ (kg/m <sup>3</sup> )	比值 <sup>①</sup>
60	0	843	1
	25	127	0.15
	50	111	0.13
	75	76.5	0.09
90	0	813	1
	25	137	0.17
	50	116	0.14
	75	127	0.16
120	0	865	1
	25	203	0.23
	50	176	0.20
	75	157	0.18

注：① 同一降雨强度各盖度坡面径流含沙量与无黑麦草覆盖坡面径流含沙量之比。

mm/h 降雨强度裸地坡面侵蚀径流含沙量为 813 kg/m<sup>3</sup>, 75% 黑麦草覆盖坡面只有 127 kg/m<sup>3</sup>; 120 mm/h 降雨强度裸地坡面径流含沙量为 865 kg/m<sup>3</sup>, 75% 黑麦草覆盖坡面只有 157 kg/m<sup>3</sup>。

同一降雨强度下, 含沙量随着盖度的增加而减少, 裸地坡面含沙量明显大于草地坡面含沙量, 说明黑麦草对坡面具有很好的减沙作用。图 3 示出降雨试验过程中径流含沙量随时间变化过程。裸地坡面含沙量很高, 且受降雨强度变化影响不显著。黑麦草覆盖坡面径流平均含沙量随降雨强度增加而增加。黑麦草覆盖坡面含沙量随时间变化较为稳定, 但是由于裸地坡面被试土壤厚度较草地坡面厚, 预降雨时没有将裸地坡面完全饱和, 裸地坡面产沙过程随时间增大(图 3(a), (c)), 但增加幅度逐渐减小, 有稳定的趋势(图 3(b))。

输沙率由径流量及含沙量计算得到, 其变化过程综合体现了径流量以及含沙量的变化过程。图 4 示出不同处理坡面输沙率随时间的变化过程。可以看出, 输沙率随降雨强度的增大而增大, 随盖度的增

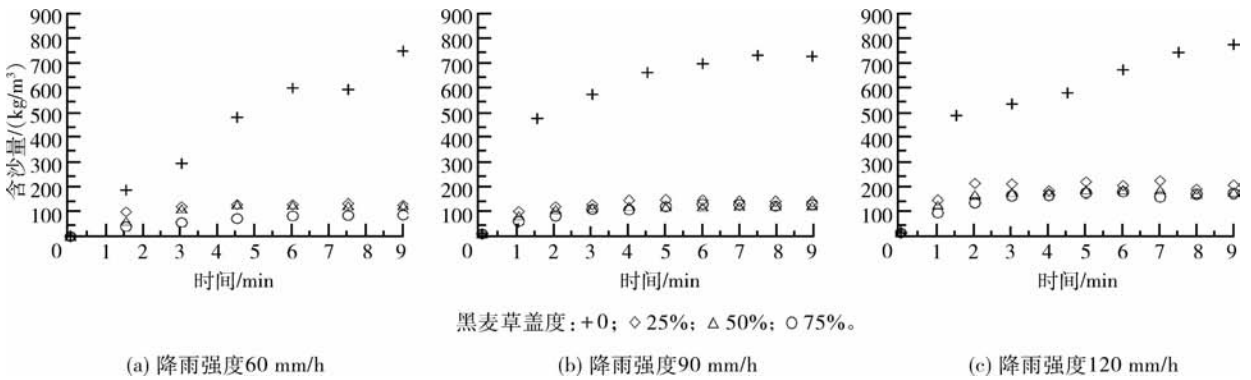


图3 不同降雨条件下不同盖度坡面径流含沙量随时间的变化

Fig. 3 Sediment concentration processes of slopes under different rye grass coverages and different rainfall intensities

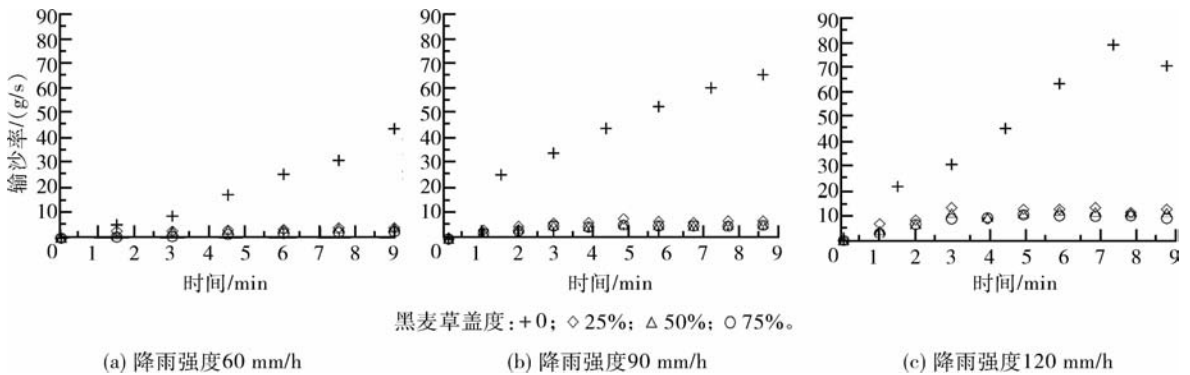


图4 不同降雨条件下不同盖度坡面径流输沙率随时间的变化

Fig. 4 Sediment delivery rate processes of slopes under different rye grass coverages and different rainfall intensities

加而减小,裸地坡面输沙率显著高于黑麦草覆盖坡面输沙率,说明黑麦草对坡面侵蚀有显著的阻流减沙作用。裸地坡面输沙率随时间变化过程与黑麦草覆盖坡面输沙率随时间变化过程有所不同:裸地坡面输沙率随时间递增,而黑麦草覆盖坡面输沙率随时间先递增而后趋于稳定,且随着降雨强度的增大侵蚀过程达到稳定的过程越快。本研究输沙率随时间的变化过程与李鹏和徐为群等的不一致,其研究结果均显示坡面径流输沙率随时间递减<sup>[20-21]</sup>。这可能是由于黑麦草覆盖对坡面的保护使侵蚀过程相对稳定所致。

累计产沙量的变化过程是产沙过程量的体现。试验测量得到的累计产沙量随时间变化的具体过程见图5。降雨试验中坡面侵蚀累计产沙量随着盖度的增大而减小,随降雨强度的增大而增大。土壤充分饱和后,不同降雨强度的累计产沙量随时间的变化为线性函数关系:

$$S = at \quad (6)$$

式中:  $S$  为累计产沙量, kg;  $a$  为回归系数;  $t$  为产流开始至试验结束的时间, s。试验结果表明,  $a$  的大小随盖度的增大而减小, 随降雨强度的增大而增大。

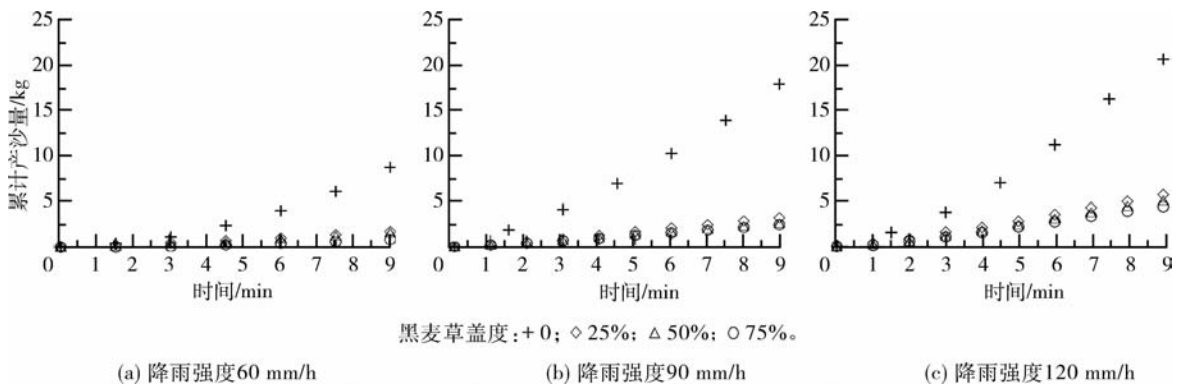


图5 不同降雨条件下不同盖度坡面产沙量随时间的变化

Fig. 5 Sedimentation yield processes of slopes under different rye grass coverages and different rainfall intensities

### 3 结论

采用室内模拟降雨试验,研究了降雨强度为60、90和120 mm/h,黑麦草盖度为0、25%、50%和75%时坡面的产流产沙过程。

径流流量随时间变化过程较为平稳,降雨强度越大,达到平稳状态越快。累计产流量随降雨强度的增大而增大;小降雨强度时,累计产流量随着盖度的增大而减少,随着降雨强度增大,不同盖度累计产流量差异不明显。累计产流量随时间呈线性增加。

裸地坡面含沙量过程随时间增大,但增加幅度逐渐减小并趋于稳定。黑麦草覆盖坡面含沙量随时间变化较为平稳。裸地坡面径流具有很高的含沙量并且受降雨强度影响不显著,黑麦草覆盖坡面径流含沙量很低,且随降雨强度增大而增加。裸地径流

含沙量远高于草地含沙量。累计产沙量随时间呈线性函数增加。

裸地坡面输沙率随时间递增,与黑麦草覆盖坡面输沙率随时间变化过程有所不同:裸地坡面输沙率随时间先递增而后很快趋于稳定,且随着降雨强度增大输沙率过程达到稳定的过程越快。

### 参 考 文 献

- [1] Van Dijk P M, Kwaad F J P M, Klapwijk M. Retention of water and sediment by grass strips [J]. Hydrological Processes, 1996, 10: 1069-1080
- [2] Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots undersimulated rainfall conditions [J]. Journal of Hydrology, 2006, 331: 178-185
- [3] Zhou Zhengchao, Shangguan Zhouping. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control [J]. Pedosphere, 2008, 18(1):

131-136

- [4] 张光辉,梁一民. 模拟降雨条件下人工草地产流产沙研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持研究,1996,2(3):56-59
- [5] Li Mian, Yao Wenyi, Ding Wenfeng, et al. Effect of grass coverage on sediment yield in the hillslope-gully side erosion system[J]. Journal of Geographical Sciences,2009,19:321-330
- [6] Wilcox B P, Wood M K. Hydrologic impacts of sheep grazing on steep slopes in semiarid rangelands[J]. Journal of Range Management,1988,41:303-306
- [7] Marques M J, Bienes R, Jimenez L, et al. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events; Rainfall simulation over USLE plots [J]. Science of the Total Environment,2007,378:161-165
- [8] Chatterjea K. The influence of tropical rainstorms on sediment and runoff generation from bare and grass-covered surfaces; a plot study from Singapore [J]. Land Degradation and Development,1998,9:143-157
- [9] Morgan R P C, McIntyre K, Vickers A W, et al. A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland[J]. Soil Technology,1997,11:291-299
- [10] Zhou Zhengchao, Shangguan Zhouping. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall[J]. Catena, 2007,70:350-355
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报,2005,36(3):371-377
- [14] 靳长兴. 坡度在坡面侵蚀中的作用[J]. 地理研究,1996,15(3):57-63
- [15] 廖义善,蔡强国,程琴娟. 黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀产沙地形因子的临界条件[J]. 中国水土保持科学,2008,6(2):32-38
- [16] 刘卉芳,曹文洪,张晓明,等. 黄土小流域水沙对降雨及土地利用变化相应研究[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(2):237-242
- [17] 刘汗,雷廷武,赵军. 土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J]. 中国水土保持科学,2009(4),7(2):1-6
- [18] 罗伟祥,向立强,宋西德,等. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. 水土保持学报,1990,4(1):20-34
- [19] 李勇,张晴雯,万国江,等. 植物根系控制黄土土层风化淋溶机制的初步研究[J]. 中国科学(D辑),2006,36(2):195-200
- [20] 李鹏,崔文斌,郑良勇,等. 草本植被覆盖结构对径流侵蚀动力的作用机制[J]. 中国水土保持科学,2006,4(1):55-59
- [21] 徐为群,倪晋仁,徐海鹏,等. 黄土坡面侵蚀过程实验研究. I. 产流产沙过程[J]. 水土保持学报,1995,9(3):9-19

(责任编辑:刘迎春)